

Année : 2012

N° d'ordre :

UNIVERSITE DE HAUTE ALSACE

Ecole Doctorale ED 494 JEAN HENRI LAMBERT

THESE

Présentée pour obtenir le grade de Docteur en

Sciences pour l'ingénieur

Discipline : Mécanique

Par

Modeste ABOE

Etude de la variabilité intra-balle des caractéristiques
technologiques des fibres de coton produites en Afrique de
l'Ouest et du Centre

Soutenue le 5 mars 2012 devant le jury composé de :

Pr. Marc RENNER	Rapporteur
Pr Christophe BALEY	Rapporteur
Pr Damien SOULAT	Examineur
Pr. Jean-Yves DREAN	Examineur
Dr. Kokou DJAGNY	Examineur
Pr. Artan SINOIMERI	Directeur de thèse
Dr. Jean-Paul GOURLOT	Codirecteur de thèse

Année : 2012

N° d'ordre :

UNIVERSITE DE HAUTE ALSACE

Ecole Doctorale ED 494 JEAN HENRI LAMBERT

THESE

Présentée pour obtenir le grade de Docteur en

Sciences pour l'ingénieur

Discipline : Mécanique

Par

Modeste ABOE

Etude de la variabilité intra-balle des caractéristiques technologiques des fibres de coton produites en Afrique de l'Ouest et du Centre

Soutenue le 5 mars 2012 devant le jury composé de :

Pr. Marc RENNER	Rapporteur
Pr Christophe BALEY	Rapporteur
Pr Damien SOULAT	Examineur
Pr. Jean-Yves DREAN	Examineur
Dr. Kokou DJAGNY	Examineur
Pr. Artan SINOIMERI	Directeur de thèse
Dr. Jean-Paul GOURLOT	Codirecteur de thèse

Avant- Propos

Remerciements

La réalisation de cette thèse n'aurait pas été possible sans le projet CSITC (*Commercial Standardization of Instrument Testing of Cotton*) dénommé CFC/ICAC/33. C'est pourquoi, en ce moment où j'écris les dernières lignes de la thèse, je voudrais témoigner ma reconnaissance à toutes les institutions et tous les partenaires de ce projet.

Je reste particulièrement reconnaissant au **Dr Jean-Paul GOURLOT**, responsable de la composante D.2.2 du projet CFC/ICAC/33, chargé de l'étude de variabilité et co-directeur de la thèse, pour son encadrement au delà de mes attentes. **Dr Jean-Paul GOURLOT** reçois mes sincères remerciements, dans ma langue maternelle « *fon* » on dit « *é na tchè* ».

Merci au **Professeur Artan SINOIMERI**, Directeur de la thèse, pour sa grande disponibilité tout au long de mes recherches, pour ses conseils judicieux, ses encouragements et son aide lors de l'élaboration de ce document.

Mes remerciements s'adressent au **Professeur Jean-Yves DREAN** Directeur du Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles pour ses précieux conseils et encouragements tout au long de mes travaux. J'ai été très honoré pour son déplacement de Mulhouse à Parakou au Bénin dans le cadre du dernier comité de suivi de ma thèse.

Il m'est particulièrement agréable de remercier le **Dr Eric GOZE** pour son aide dans les domaines de la programmation informatique, de la gestion des données nombreuses et variées qui ont été récoltées. Merci pour son soutien, ses conseils, ses nombreux encouragements, son amitié et pour l'intérêt qu'il a apporté à mes travaux.

Je remercie les rapporteurs, le Professeur **Marc RENNER** et le Professeur **Christophe BALEY** qui ont accepté la fastidieuse tâche de rapporteur.

Je remercie les membres de mon jury de soutenance qui, malgré leurs multiples occupations se sont déplacés pour examiner ce travail. Un sincère remerciement au **Dr Kokou DJAGNY**, Directeur Général de la NSCT et vice président de l'Association Cotonnière Africaine (ACA) pour son déplacement depuis le Togo.

Je tiens à remercier le centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) qui a accepté de m'accueillir durant ces trois années. Je remercie **Florent MARAUX**, **Bruno BACHELIER**, **Michel CRETENET**, **Michel FOK**, **Hervé GACE**, **Cécile FOVET-RABOT**, **Martine DUPORTAL**. Je remercie spécialement **Liliane LIGNOT** pour son efficacité dans les démarches administratives et dans le cadre de mes nombreux voyages.

Je dis un grand merci à tout le personnel du laboratoire de technologie et de caractérisation des fibres du CIRAD pour son amabilité : **Gérard, Serge, Michel, Mireille, Marie-Elyse, Michèle et Philippe.**

Je remercie tous les membres du laboratoire de Physique et de Mécanique Textiles (LPMT), laboratoire qui m'a accueilli pendant ces trois années. Je remercie spécialement **Agnès Schwob** pour son accueil chaleureux lors de mes séjours au laboratoire.

Je tiens à remercier tous les enseignants et professeurs des Universités du Bénin qui m'ont encouragé et accompagné dans cette difficile entreprise particulièrement le **Pr Bonaventure BOYI, le Pr Siméon FAGNISSE et M. Henri SESSOU.**

Je remercie tous les amis docteurs et doctorants notamment **Dr Alexis, Dr Emmanuel, Dr Franck, Eunice, Augustion, Davina, Mohamed et Foued.**

A **Pascal HUBLE**, Etudiant en Statistique, qui lors de son stage au CIRAD m'a aidé à analyser mes données.

Au Centre Régional Technique de l'Afrique de l'Ouest, particulièrement **Yamadou SISSOKO** technicien CMI chargé d'analyser les échantillons de coton ayant servi pour la thèse.

Aux Sociétés cotonnières pour avoir accepté l'échantillonnage des usines retenues pour l'étude de la variabilité.

Aux chefs classeurs pour leurs soutiens indéfectibles lors de mes campagnes d'échantillonnage : **Béatrice, Alidou, Joël, Idy, Mamadou, Limdeyou, Saïdina, et Camille.**

A tous mes camarades et collègues du Service Classement du Bénin : **Adrien, Damien, François-Xavier, Sari, Hyacinthe, Youssaou, Yacoubou, Kouma, Amidou, Faustin, Augustin, Sanni, Patrick, Bio, Djamila, Safiou, Nasser, Mama, Wando, Somma, Anouar, Ahmed et Mathias.**

Je vous prie d'accepter à cette occasion le témoignage de ma très profonde reconnaissance pour votre précieuse contribution tout au long de mes travaux recherches.

Je remercie tous les responsables de la SONAPRA, en particulier **M. Idrissou Bio Gounou SINA** DG SONAPRA et **Jocelyn NENEHIDINI** pour m'avoir autorisé et détaché à préparer cette thèse, et l'Association Interprofessionnelle du Coton (AIC/Bénin) pour la reprise de cet engagement, leurs soutiens et leurs encouragements tout au long de mes recherches, particulièrement **Narcisse DJEGUI, Giles HOUNDOLO, Bonaventure KOUAKANOU, Désiré AGOUNDOTE et Alidou AMADOU SOULE.** Je

remercie spécialement **Gildas PATINVOH** pour son aide dans les démarches administratives.

Je tiens à remercier très vivement et amicalement **Jules DOVONOU** et son épouse **Bénédicta, Clément SOUDE, Sari KASSA** et **Cosme MAHISSO**.

Je remercie très fraternellement mes cousins **Guillaume, Boniface et Daniel**.

A mes frères et sœurs **Benjamin, Lucien, Philomène et Suzanne**, retrouvez à travers ce travail le fruit de vos prières et de vos soutiens.

Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance à **Antoinette** ma mère pour m'avoir donné la vie et pour ses prières lors de mes voyages d'étude.

Je dédie avec affection l'ensemble de ce travail à feu mon père Marc ABOE pour ses souffrances jusqu'à sa mort dans la scolarisation de ses enfants.

A **Claudine** ma bien aimée épouse, retrouve à travers ce travail le prix de ton courage et de tes nombreux sacrifices.

A **Inès, Eurielle, Boris, Lydie et Antoinette** qui avez souffert de mon absence parfois prolongée, retrouvez à travers le fruit de ce travail le réconfort pour vos projets futurs.

Mulhouse le 1^{er} décembre 2011.

Remerciements spécifiques

The authors want to thank the financial contributors who rendered this study possible as *"This project CFC/ICAC/33 is being co-financed by the Common Fund for Commodities, an intergovernmental financial institution established within the framework of the United Nations, headquartered in Amsterdam, the Netherlands, and by the European Union in the framework of the European Commission's" All ACP Agricultural Commodities Programme" under the sponsorship of the International Cotton Advisory Committee (ICAC) Washington (USA) and under the supervision of the Faserinstitut of Bremen (FIBRE), Germany.*

Disclaimer

This document has been prepared within the project CFC/ICAC/33. The views expressed are not necessarily shared by the Common Fund for Commodities and/or the European Commission and/or the International Cotton Advisory Committee. The designation employed and the representation of material in this report do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Common Fund for Commodities and/or the European Commission or the International Cotton Advisory Committee concerning the legal status of any country, territory, city or area or its authorities, or concerning the delineation of its frontier or boundaries. ».

Liste des abréviations

ACA : Association Cotonnière Africaine

AIC : Association Inter-professionnelle du Coton, Bénin

AOC : Afrique de l'Ouest et du Centre

ASTM : *American Standard for Testing and Materials*

+b ou X.b : Degré de jaune = *Yellowness*

CD : *Compact Disc*

CFA : Colonies Françaises d'Afrique devenu Communauté Financière Africaine

CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier, France

CMI : Chaîne de mesures intégrées (équivalent du terme anglais HVI® *High Volume Instrument*)

CSITC : Groupe de travail pour la *Commercial Standardization of Instrument Testing for Cotton*

ENSISA : Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud Alsace

ICAC : *International Cotton Advisory Committee* (en français CCIC : Comité Consultatif International du Coton)

ICCS : *International Calibration Cotton Standard*

IM= Mic : Micronaire

ITMF-ICCTM : *International Textile Manufacturers Federation, International Committee for Cotton Testing Methods*

LPMT : Laboratoire de Physique et de Mécanique Textile

ML : *Mean Length*

NSCT : Nouvelle Société Cotonnière du Togo

Rd : Reflectance

RTC : *Regional Technical Center* ou Centre Technique Régional, en Afrique de l'Ouest (Mali) et de l'Est (Tanzanie)

SODEFITEX : Société de Développement et des Fibres Textiles

SONAPRA : Société Nationale pour la Promotion Agricole

SOSEA : Société de Service Europe Afrique

Str : *Strength*

UHA : Université de Haute Alsace

UHML : *Upper Half Mean Length*

UHVICC : *Universal High Volume Instrument Calibration Cotton*

SW : *Short-Weak*, coton d'étalonnage à fibre courte et avec une faible ténacité

LS : *Long Strong*, coton d'étalonnage à fibre longue et avec une forte ténacité

UI : *Uniformity Index*

USA : *United States of America*

USDA-AMS : *United States Department of Agriculture, Agricultural Marketing Services*

Sommaire

Sommaire

Avant- Propos.....	2
Sommaire	8
Introduction Générale.....	22
Contexte général	23
Plan d'évolution des idées développées dans la thèse	25
Chapitre I Généralités sur le coton.....	27
I.1. Le cotonnier, culture et transformation	28
I.1.1. Le cotonnier du champ à la fibre	28
I.1.1.1. Le genre Gossypium L.	28
I.1.1.2. Morphologie et développement	29
I.1.1.2.1. Morphologie	29
I.1.1.2.2. Cycle du cotonnier	29
I.1.1.3. Conduite de la culture.....	31
I.1.1.3.1. La récolte	32
I.1.1.3.2. L'égrenage	33
Égreneuse à rouleau	34
Égreneuse à scies	35
Opérations ultérieures	36
I.1.2. La graine de coton	37
I.1.3. La fibre de coton et sa transformation	38
I.1.3.1. Formation et structure	38
I.1.3.2. Les différentes étapes de la transformation de la fibre.....	41
I.1.3.2.1. La filature	43
I.1.3.2.2. Le tissage et le tricotage	43
I.1.3.2.3. La finition et la confection.....	44

I.2.	Organisation et activités de production des filières cotonnières en AOC	45
I.2.1.	Activités de recherche	45
I.2.2.	Organisation et appui technique aux cotonculteurs.....	45
I.2.3.	Production et acheminement du coton-graine vers les usines d'égrenage	46
I.2.3.1.	Production et distribution des semences.....	46
I.2.3.2.	Pratiques culturales	47
I.2.3.3.	Commercialisation primaire et acheminement du coton graine vers les usines d'égrenage	47
I.2.4.	Egrenage du coton-graine et transport des échantillons vers les centres de classement	48
I.2.5.	Organisation du classement de la fibre	49
I.2.6.	Stratégie de vente des fibres AOC et transport des balles vers les ports	50
I.3.	Statistiques de production cotonnière.....	51
I.3.1.	A travers le monde.....	51
I.3.2.	En Afrique et particulièrement en AOC.....	53
Chapitre II Problématique de la recherche, objectifs et hypothèses		55
II.1.	Problématique de la recherche.....	56
II.2.	Objectifs de la recherche	58
II.3.	Hypothèses testées	59
II.3.1.	Hypothèse 1	59
II.3.2.	Hypothèse 2.....	59
II.3.3.	Hypothèse 3.....	60
Chapitre III Les méthodes de classement des fibres de coton.....		61
III.1.	Introduction.....	62
III.2.	Classement manuel et visuel.....	62
III.2.1.	Définition.....	62
III.2.2.	Ressources et équipements nécessaires des salles de classement manuel et visuel	63

III.2.2.1. Ressources humaines	63
III.2.2.2. Salle de classement	63
III.2.3. Description des critères de qualité du classement manuel et visuel	64
III.2.3.1. Grade ou classe	64
III.2.3.2. Longueur de la soie	65
III.2.3.3. Caractère du coton	65
III.2.4. Technique de classement manuel et visuel	65
III.2.4.1. Opération de détermination du grade ou type de vente	65
III.2.4.1.1. Standards de qualité	66
III.2.4.1.2. Mode opératoire et analyse des échantillons	66
III.2.4.2. Opération de détermination de la longueur de la soie	67
III.3. Classement Instrumental	69
III.3.1. Définition	69
III.3.2. Equipements utilisés pour le classement Instrumental	69
III.3.2.1. Laboratoire d'analyse	70
III.3.2.1.1. Système conditionnement d'air ambiant et l'isolation du laboratoire ..	70
III.3.2.1.2. Dispositifs de fourniture d'énergie et de fluides	70
III.3.2.2. Instruments de caractérisation de la fibre de coton	70
III.3.3. Caractéristiques technologiques des fibres de coton et principes de mesure ..	71
III.3.3.1.1. Micronaire	71
III.3.3.1.2. La longueur et l'uniformité de la longueur	72
III.3.3.1.3. La ténacité et principe de mesure	75
III.3.3.1.4. La Colorimétrie (Rd et +b)	76
III.3.4. Techniques du classement instrumental	77
III.3.4.1. Conditionnement des échantillons	77
III.3.4.2. Mode opératoire du classement instrumental	77
III.3.4.3. Etalonnage / ajustage de l'instrument de mesure	78

III.3.4.4.	Nécessité d'une standardisation et d'une harmonisation des tests	79
III.3.4.4.1.	Tests intra-laboratoire : les re-tests internes	80
III.3.4.4.1.	Tests intra-laboratoire : les re-tests externes	80
III.3.4.4.2.	Tests inter-laboratoires : les round-tests internationaux	80
III.4.	Analyse critique des méthodes de classement et pré-requis nécessaires	81
III.5.	Conclusion	82
Chapitre IV	Estimation de la variance intra-balle et détermination des modalités d'échantillonnage et de mesure sur CMI	84
IV.1.	Introduction	85
IV.2.	Matériels et méthodes	86
IV.2.1.	Dispositif expérimental	86
IV.2.1.1.	Choix des situations	86
IV.2.1.2.	Mode de prélèvement des échantillons	87
IV.2.1.3.	L'analyse des échantillons sur CMI	89
IV.2.2.	Méthodes statistiques d'analyse des données	93
IV.2.2.1.	Méthodes statistiques d'étude des matières de référence (standards)	93
IV.2.2.2.	Méthodes statistiques utilisées pour analyser les données des échantillons prélevés	94
IV.2.2.2.1.	Modèle de décomposition de la variance	94
IV.2.2.2.2.	Définition du risque de litige et mode de calcul	95
IV.2.2.2.3.	Méthodologie pour définir le mode opératoire (nombre d'échantillons et de mesures par balle par caractéristique technologique)	98
IV.3.	Résultats et discussions	100
IV.3.1.	Résultats et discussions sur l'analyse des matières de référence	100
IV.3.2.	Résultats et discussions sur l'analyse des données des échantillons prélevés	102
IV.3.2.1.	Etude exploratoire	102
IV.3.2.1.1.	Echelle usine et balle	102

IV.3.2.1.2. Echelle usine, balle et répétition de mesure	104
IV.3.2.2. Détermination des variances d'échantillonnage pour une balle et proposition de modalités d'échantillonnage et d'analyse	108
IV.3.2.2.1. Le Micronaire	112
IV.3.2.2.2. La longueur UHML et son uniformité UI	114
IV.3.2.2.3. La ténacité Str.....	116
IV.3.2.2.4. Réflectance et Indice de jaune	117
IV.4. Conclusion	122
Chapitre V Etude de la variabilité inter balles : première approche de l'amélioration de la précision de mesure par la méthode du krigeage	123
V.1. Introduction	124
V.2. Variabilité inter balles et possibilité d'interpolation	125
V.2.1. Expérimentations : échantillonnage et mesure sur CMI	125
V.2.2. Méthode statistique d'analyse des données	127
V.2.2.1. Modèle statistique.....	128
V.2.3. Résultats et discussion	130
V.3. Amélioration de la précision de mesure d'une balle par la méthode de krigeage	137
V.3.1. Expérimentation: échantillonnage et mesure sur CMI	137
V.3.2. Méthode statistique d'analyse des données	139
V.3.3. Résultats et discussion	141
V.3.3.1. Existence et intensité de l'autocorrélation	141
V.3.3.2. Prédiction de la valeur d'un échantillon non observé de la balle à l'aide du krigeage ponctuel	143
V.4. Conclusion	146
Conclusions et perspectives.....	147
Conclusion.....	148
Perspectives.....	151
Bibliographie.....	153

Annexe 1 Boxplots par variable, par situation et par saison dans l'étude de variabilité intra-balle.....	161
Annexe 2 : Valeurs des effets de pépité.....	171
Annexe 3 : Variogrammes par usine et par caractéristique technologique	173
.	173

Liste des figures

Figure 0-1 : Balles de coton à la sortie d'une usine d'égrenage (Cliché M. Aboé).....	25
Figure I-1 : Phases de développement du cotonnier (Archives Cirad).....	30
Figure I-2 : Développement du fruit du cotonnier <i>G. hirsutum</i> (Archives Cirad).....	31
Figure I-3 : Propreté du coton-graine selon le mode de récolte (Clichés J.L.Chanselme).	34
Figure I-4 : Récolteuses mécaniques (Clichés J.-L. Chanselme).	34
Figure I-5 : Schéma d'une égreneuse à rouleau (Parry, 1982).	35
Figure I-6 : Schéma d'une égreneuse à scies (Parry, 1982).....	36
Figure I-7 : Coupe longitudinale de deux graines de coton, glanded et glandless (Archives Cirad-ca).....	38
Figure I-8 : Développement de la fibre de coton à partir de l'anthèse (d'après (Roerich, 1947)).	39
Figure I-9 : Coupe longitudinale schématique d'une fibre de coton (Parry, 1982).	39
Figure I-10 : Coupe schématique de fibres immatures à très mûres ; dessèchement et aplatissement des fibres après ouverture de la capsule (Jacquemart, 1953; Roerich, 1947).	41
Figure I-11 : Vue microscopique de sections de fibres mûres (Desplans, 1996).	41
Figure I-12 : Schéma de l'organisation de la filière textile (Gourlot, 1999).	42
Figure I-13 : Exemple de dispositif coupant 'cutter' pour effectuer le prélèvement des échantillons de fibres dans les balles de coton au moment du pressage de la balle (Cliché J.-P. Gourlot).	49
Figure I-14 : Echantillon prélevé dans une balle suite à son découpage au sabot (d'où le nom d'échantillon au sabot) : L'échantillon au sabot sur une balle à sa sortie de l'usine est situé en bas de la balle (Cliché M. Aboé).	49
Figure I-15 : Zones de culture cotonnière dans le monde (d'après Matthews, 1989).	51
Figure I-16 : Répartitions des productions de fibres entre pays, source (ICAC, 2010).	52
Figure I-17 : Répartition des exportations, source (ICAC, 2010).	52
Figure I-18 : Parts respectives des productions en Afrique, source (ICAC, 2010).....	53

Figure I-19 : Productions (x 1000 tonnes) sur les dix dernières années des huit pays de l'AOC source (ICAC, 2010).	54
Figure II-1 : Exemple de lot de balles (Cliché par M. Aboé).	56
Figure II-2 : Exemples de champs de coton en culture mécanisée (a) et en culture extensive (b) (Archives Cirad).	58
Figure II-3 : Carte d'Afrique et mise en évidence des huit pays cadre de notre étude.	59
Figure III-1 : Salle de classement manuel et visuel de Boundiali en Côte d'Ivoire (Cliché M. Aboé).	64
Figure III-2 : Boîtes standards des types de vente du Bénin confectionnées au renouvellement de 2010 (Cliché M. Aboé).	66
Figure III-3 : Disposition des échantillons sur la table de classement (Cliché M. Aboé).	67
Figure III-4 : Détermination de la soie par le Chef Classeur de la SODEFITEX/ Sénégal (Cliché I. Ka).	68
Figure III-5 : Illustration des longueurs de soie obtenue par la méthode du 'pulling' (Cliché M. Aboé).	69
Figure III-6 : CMI, modèle HVI 1000 M1000 de Uster Technologies (Cliché du recueil publicitaire).	71
Figure III-7 : Principe de mesure du micronaire.	72
Figure III-8 : Principe d'échantillonnage des fibres pour la caractérisation de leur longueur. 73	
Figure III-9 : Représentation de la distribution de la longueur des fibres sous la forme d'un histogramme.	73
Figure III-10 : Représentation de la distribution de la longueur des fibres sous la forme d'un diagramme.	73
Figure III-11 : Représentation de la distribution de la longueur des fibres sous la forme d'un fibrogramme normalisé.	73
Figure III-12 : Système d'interprétation du fibrogramme ; principe des Mean Lengths.	74
Figure III-13 : Principe de mesure de la ténacité.	76
Figure III-14 : Graphe de couleur USDA.	77
Figure IV-1 : Exemple de balle de coton et indication des 8 couches prélevées	88

Figure IV-2 : Comparaison des valeurs mesurées sur les 2 étalons avec les valeurs attendues.....	90
Figure IV-3 : Extrait d'une fiche de résultats CMI.....	91
Figure IV-4: Courbe de gauss montrant la zone de litige.....	96
Figure IV-5 : Les différents types de courbe d'iso-variances ayant permis de déterminer le mode opératoire optimum.	100
Figure IV-6 : Micronaire : Boxplots usine, balle et répétition. Chaque point représente le résultat d'une répétition de mesure d'un échantillon. (a) et (b) représentent des cas extrêmes observés dans les résultats.....	105
Figure IV-7 : Longueur UHML (mm) : Boxplots usine, balle et répétition. Chaque point représente le résultat d'une répétition de mesure d'un échantillon. (a) et (b) représentent des cas extrêmes observés dans les résultats.	106
Figure IV-8 : Uniformité de longueur UI (%) : Boxplots usine, balle et répétition. Chaque point représente le résultat d'une répétition de mesure d'un échantillon. (a) et (b) représentent des cas extrêmes observés dans les résultats.	106
Figure IV-9 : Ténacité STR (cN/tex) : Boxplots usine, balle et répétition. Chaque point représente le résultat d'une répétition de mesure d'un échantillon. (a) et (b) représentent des cas extrêmes observés dans les résultats.	107
Figure IV-10 : Réflectance (%) : Boxplots usine, balle et répétition. Chaque point représente le résultat d'une répétition de mesure d'un échantillon. (a) et (b) représentent des cas extrêmes observés dans les résultats.	108
Figure IV-11 : Indice de jaune : Boxplots usine, balle et répétition. Chaque point représente le résultat d'une répétition de mesure d'un échantillon. (a) et (b) représentent des cas extrêmes observés dans les résultats.	108
Figure IV-12 : Micronaire: Ecart-types inter-couches (SigmaA) vs intra-couche (SigmaE). Les balles qui proviennent des situations qui sont à l'intérieur du cercle en gras respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% avec une couche et une répétition de mesure. Les balles des situations qui sont à l'intérieur de l'ellipse en pointillé sont celles qui respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% mais avec deux couches et une répétition de mesure. <i>Jusqu'à la Figure IV-17, on y trouve également les deux situations extrêmes vues dans les boxplots vus plus haut.</i>	113

Figure IV-13 : UHML : Ecart-types inter-couches (ΣA) vs intra-couche (ΣE). Les balles qui proviennent des situations qui sont à l'intérieur du cercle en gras respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% avec une couche et une répétition de mesure. Les balles des situations qui sont à l'intérieur du cercle en pointillé sont celles qui respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% mais avec deux couches et deux répétitions de mesure.....	114
Figure IV-14 : UI: Ecart-types inter-couches (ΣA) vs intra-couche (ΣE). Les balles qui proviennent des situations qui sont à l'intérieur du cercle en gras respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% avec une couche et une répétition. Les balles des situations qui sont à l'intérieur de l'ellipse en pointillé sont celles qui respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% avec une couche et deux répétitions de mesure.	115
Figure IV-15 : Ténacité: Ecart-types inter-couches (ΣA) vs intra-couche (ΣE). Les balles qui proviennent des situations qui sont à l'intérieur du cercle en gras respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% avec une couche et une répétition. Les balles des situations qui sont à l'intérieur de l'ellipse en pointillé sont celles qui respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% avec une couche et deux répétitions de mesure.	116
Figure IV-16 : Réflectance: Ecart-types inter-couches (ΣA) vs intra-couche (ΣE). Les balles qui proviennent des situations qui sont à l'intérieur du cercle en gras respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% avec une couche et une répétition de mesure. Les balles des situations qui sont à l'intérieur de l'ellipse en pointillé sont celles qui respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% mais avec deux couches et une répétition de mesure.	117
Figure IV-17 : Indice de jaune: Ecart-types inter-couches (ΣA) vs intra-couche (ΣE). Les balles qui proviennent des situations qui sont à l'intérieur du cercle en gras respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% avec une couche et une répétition de mesure. Les balles des situations qui sont à l'intérieur de l'ellipse en pointillé sont celles qui respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% mais avec deux couches et une répétition de mesure.	118
Figure IV-18 : Schéma des différentes possibilités pratiques d'échantillonnage et d'organisation des caractérisations technologiques à partir d'échantillons de balle.	120

Figure V-1 : Modalités d'échantillonnage des balles dans l'expérimentation de validation de l'interpolation des valeurs des balles.....	126
Figure V-2 : Str (g/tex) des matières de références et des deux répétitions de mesures par échantillon dans la situation C4G1, saison 1. Evolutions comparées des mesures obtenues sur les standards (LS en traits pleins épais, SW en pointillé épais) et sur les échantillons analysés. On ne note pas de parallélisme entre ces évolutions sur les trois figures de ce type.....	131
Figure V-3 : UI des matières de références et des deux répétitions de mesures par échantillon dans la situation C2G3, saison 1.	131
Figure V-4 : Mic des matières de références et des deux répétitions de mesures par échantillon dans la situation C2G3, saison 1.	132
Figure V-5 : Résultats des deux répétitions de mesure des longueurs UHML (mm) des 100 balles consécutives prélevées en saison 2 pour la situation C1G1 : série régulière de données.....	133
Figure V-6 : Semi-variogramme de l'UHML des échantillons des 100 balles consécutives prélevées en saison 2 de la situation C1G1.....	133
Figure V-7 : Résultats des deux répétitions de mesure des uniformités UHML des 200 balles consécutives prélevées en saison 1 pour la situation C4G1 : série moins régulière.	134
Figure V-8 : Semi-variogramme de UHML des échantillons des 200 balles consécutives prélevées en saison 1 de la situation C4G1.....	134
Figure V-9 : Effet de pépite estimé sur chaque caractéristique technologique : distributions en 2009 et 2010.	136
Figure V-10 : Modalités d'échantillonnage des balles dans l'expérimentation de validation de l'interpolation des valeurs des balles.....	137
Figure V-11 : Variogramme de Rd dans la situation C1G3.	142
Figure V-12 : Variogramme de Str dans la situation C6G2.	142

Liste des tableaux

Tableau III-I : Caractéristiques typiques des matières de référence pour la longueur et la ténacité (USDA, 2001).	79
Tableau IV-I : Codage des facteurs de variation utilisés : 8 pays de l'AOC et 2 ou 3 situations par pays.....	87
Tableau IV-II : Nombre de balles par situation.	88
Tableau IV-III : Nombres d'échantillons testés par situation, par saison et par répétition pour les standards et les balles échantillonnées.	92
Tableau IV-IV: Valeurs conventionnelles des standards utilisés.....	93
Tableau IV-V : Tolérances commerciales utilisées pour calculer le risque de litige (USDA, 2001).	97
Tableau IV-VI : Résultats des mesures sur les standards.	101
Tableau IV-VII : Niveau de signification des tests sur l'effet heure et date dans les analyses des standards de référence qui étaient intégrés dans les séries d'échantillons de balles. Les effets Date et Heure sont regroupés, les étoiles ou points représentent les p-value significatives à comparer avec la légende qui se trouve au dessus du tableau.	101
Tableau IV-VIII : Exemple de résultats de mesure des 6 caractéristiques technologiques pour une usine échantillonnée pendant les deux saisons d'expérimentation.....	103
Tableau IV-IX : Valeurs de SigmaA et SigmaE pour toutes les situations et toutes les caractéristiques.	109
Tableau IV-X : Résumé du nombre de situations parmi 31 selon différents modes opératoires d'échantillonnage définis de la Figure IV-12 à Figure IV-17.....	119
Tableau IV-XI : Comparaison de procédures de test sur CMI : nombre de mesures par balle aux USA et dans notre proposition pour l'AOC.	121
Tableau V-I : Nombres de balles dans lesquelles des échantillons ont été prélevés par saison pour l'expérimentation.....	127
Tableau V-II : Nombre d'échantillons prélevés en bas et en haut dans des balles successives durant 10 semaines successives au maximum dans les différentes situations étudiées en saison 2.	138
Tableau V-III : Nombre de balles successives échantillonnées durant 10 semaines successives au maximum dans les différentes situations étudiées en saison 2.	139

Tableau V-IV a : Résultats de l'interpolation ponctuelle.....	144
---	-----

Introduction Générale

Introduction générale

Contexte général

Première fibre textile dans le monde, la fibre de coton pour être commercialisée est pressée généralement sous forme de balles (Figure 0-1). La balle est l'unité d'échange sur les marchés internationaux de New-York, Alexandrie, Liverpool, Brème, etc. où les cours dépendent de la situation du moment (fonction de l'offre et de la demande), de l'état des stocks et des prévisions de production. L'influence des grands exportateurs pèse fortement sur ce libre échange. La valeur marchande de la balle de coton fibre sur ces marchés dépend entre autres de sa qualité. La fibre de coton étant une matière textile, la caractérisation de sa qualité est nécessaire pour répondre aux exigences de productivité aux étapes de filature, de tissage et tricotage, de teinture et de finition et de la qualité des produits qui en sont issus (Sasser and Smith, 1984). Cela explique pourquoi le commerce du coton est basé sur les caractéristiques de la fibre déterminées au cours du classement coton fibre - opération pendant laquelle la 'qualité' des fibres est évaluée - avant sa commercialisation à travers le monde.

Sasser (Sasser and Moore, 1992) et Knowlton (Knowlton, 2005) ont décrit les trois principales périodes qui ont caractérisé la technique de classement de la fibre de coton. Il s'agit premièrement du classement manuel et visuel, deuxièmement du classement manuel et visuel plus les instruments classiques d'analyse de la fibre et troisièmement le classement manuel et visuel accompagné de l'utilisation d'instruments de mesure très automatisés que sont les Chaînes de Mesures Instrumentales (CMI).

Les USA (*United States of America*) sont les premiers utilisateurs des CMI appelés *High Volume Instruments* (HVI¹), qu'ils utilisent pour le commerce du coton fibre depuis 1991 dans un classement dit 'instrumental'. L'*International Cotton Advisory Committee* (ICAC), (ICAC-Secretariat, 2011) a estimé qu'environ 50% des balles produites dans le monde sont

¹ L'acronyme HVI® est protégé par la société Uster Technologies Inc., Knoxville, TN, Etats-Unis d'Amérique ; en conséquence, pour le remplacer, le terme CMI sera utilisé dans ce document. Depuis la protection de cet acronyme, il est remplacé par l'appellation en anglais de '*Standardized Instrument for Testing Cotton*' (SITC).

vendues sur la base d'une analyse par instrument de mesure. Ces instruments mesurent entre autres le micronaire, la longueur, l'uniformité de la longueur, la ténacité et la colorimétrie (réflectance et l'indice de jaune). Ces paramètres technologiques de la fibre sont actuellement utilisés pour classer les balles, constituer des lots et pour vendre la fibre de coton.

En Afrique, aucune caractéristique technologique n'est utilisée régulièrement pour vendre les balles de coton. Le classement demeure généralement manuel et visuel, les instruments existants analysent quelques échantillons de la production locale dans le but d'assurer une veille de la qualité et de répondre aux demandes des centres de recherches coton et fibre.

Depuis plusieurs décennies, les américains et certains acteurs de la filière arrivent à satisfaire cette exigence des filateurs pour une caractérisation instrumentale alors que les pays d'Afrique producteurs de coton n'y parviennent pas. L'Afrique ne possède pas un tel système de caractérisation de la fibre. Or vouloir le faire suivant les méthodes utilisées aux Etats Unis peut conduire à des réclamations de qualité pour les sociétés cotonnières africaines, car les conditions et les modes de productions sont complètement différents.

Aucune publication scientifique ou technique ne démontre que les méthodes existantes et les instruments peuvent être adaptés à toutes les autres conditions de production surtout celles de l'Afrique de l'Ouest et du Centre.

Il est donc indispensable de mettre en place des méthodes et procédures d'analyse adaptées aux conditions africaines et qui garantissent la fiabilité des résultats et le respect des tolérances internationales reconnues.

Cette conception requiert une bonne évaluation du niveau de variabilité intra et inter balles des six caractéristiques technologiques de la fibre de coton recommandées par le groupe de travail ICAC intitulé *Commercial Standardization of Instrument Testing of Cotton* (ICAC-CSITC). Ces caractéristiques sont le micronaire, la ténacité, la longueur de la fibre, l'uniformité de la longueur, la réflectance et l'indice de jaune. Ces caractéristiques ont en effet été incluses dans les règlements généraux des Associations Cotonnières en complément / supplément des caractéristiques évaluées de manière visuelle et manuelle.

Ce mémoire de thèse intitulé « Etude de la variabilité intra-balle des caractéristiques technologiques des fibres de coton produites en l'Afrique de l'Ouest et du Centre » a pour objectif d'établir des méthodologies d'échantillonnage et d'analyse sur CMI. Il s'agit de déterminer le nombre d'échantillons par balle, le type d'analyse et le nombre de mesures par

balle pour chaque caractéristique technologique dans le respect des tolérances admises dans les échanges internationaux de fibres.

L'étude a démarré dans le cadre d'une collaboration étroite entre l'entreprise AIC dont l'auteur de cette thèse fait partie, le Centre Technique Régional (CTR) d'Afrique de l'Ouest, le CIRAD, et le LPMT de l'Université de Haute Alsace.

Le travail que nous nous proposons de réaliser consiste à estimer la variance intra-balle et inter-balle de chacune des six caractéristiques technologiques citées plus haut dans le respect d'un dispositif expérimental spécialement mis en place. Les échantillons utiles à cette étude proviennent des bassins de production d'Afrique de l'Ouest et du Centre.

Selon la bibliographie, aucun dispositif de mesure de la variabilité intra-balle des fibres de coton d'Afrique de l'Ouest et du Centre n'existe ; nous nous proposons donc de réaliser pour une première fois ce travail de recherche.



Figure 0-1 : Balles de coton à la sortie d'une usine d'égrenage (Cliché M. Aboé).

Plan d'évolution des idées développées dans la thèse

Le présent mémoire de thèse est composé de cinq chapitres. Nous commencerons par un premier chapitre dans lequel nous donnerons les généralités sur le coton, l'organisation des filières cotonnières en Afrique de l'Ouest et du Centre.

Le Chapitre II sera consacré à la problématique de la recherche, les objectifs généraux et spécifiques poursuivis et les hypothèses vérifiées.

Dans le Chapitre III, nous décrivons les deux grandes familles de classement que sont le classement manuel et visuel d'une part et le classement instrumental d'autre part pour en faire une analyse critique.

Le Chapitre IV se focalisera sur l'estimation de la variance intra-balle des productions de l'AOC et une proposition de méthode d'échantillonnage et de procédure d'analyse.

Le Chapitre V décrira la variabilité inter balles et les possibilités d'amélioration de la précision de mesure de la moyenne d'une balle.

Enfin, dans la conclusion et les perspectives, nous tenterons de relier les deux études de variabilité et ensuite de faire ressortir quelques perspectives.

Chapitre I

Généralités sur le coton

Chapitre I. Généralités sur le coton

La lecture de divers ouvrages permettant de décrire les différents points à aborder dans ce chapitre, nous a renforcés dans l'idée que la description du cotonnier, sa culture et sa transformation produite par Krifa (Krifa, 2001) et modifiée par Gourlot (Gourlot, 2002) est d'une qualité exceptionnelle. Aussi, en accord avec l'auteur, nous nous sommes permis de retranscrire *in extenso* cette partie de son document de thèse dans les paragraphes suivants (paragraphe I.1.1 suivant jusqu'au paragraphe I.1.3.1 inclus).

Nous avons complété cette généralité sur le coton en relatant plus particulièrement les différentes étapes de la filière textile, l'organisation des filières cotonnières en AOC ainsi que les statistiques de production cotonnière à travers le monde et en Afrique.

I.1. Le cotonnier, culture et transformation

[Extrait de la thèse de Mourad KRIFA et Jean-Paul GOURLOT]

I.1.1. Le cotonnier du champ à la fibre

I.1.1.1. Le genre *Gossypium* L.

*Les cotonniers sont des dicotylédones, appartenant à l'ordre des Malvales, à la famille des Malvacées, à la tribu des Hibiscées et au genre *Gossypium* L. Parmi les 51 espèces recensées à ce jour, seules quatre portent des fibres cellulosiques sur les graines et constituent le groupe des cotonniers cultivés (Lagière, 1966; Parry, 1982) :*

- *Gossypium herbaceum* et *Gossypium arboreum* : ces deux espèces ont une longue histoire de culture en Afrique et en Asie. Elles sont caractérisées par des fibres très courtes (inférieures à 25 mm) et ne représentent que 3 à 4% du coton cultivé.
- *Gossypium barbadense* : originaire de l'Amérique du Sud tropicale, elle s'est répandue en Amérique Centrale et aux Caraïbes. Elle a été introduite en Caroline du Sud à la fin du XVIIIème et en Égypte au XIXème siècle. De cette espèce sont issus les cotons longues soies, à fibres extra longues (supérieures à 33 mm). Elle représente 5 à 7% du coton cultivé dans le monde.
- *Gossypium hirsutum* : majoritaire dans le groupe des espèces cultivées (plus de 90%), elle est caractérisée par des fibres moyennes à longues (25 à 32 mm).

Certaines des espèces sauvages sont exploitées par les sélectionneurs pour l'amélioration variétale des quatre espèces cultivées, et constituent une source potentielle de création de nouvelles variétés (Mergeai, Noel et al., 1993).

I.1.1.2. Morphologie et développement

Le cotonnier est un arbuste de un à deux mètres de hauteur. Pérenne à l'état sauvage, il est très majoritairement cultivé comme plante annuelle. La culture pluriannuelle est économiquement peu rentable pour des raisons climatiques et phytosanitaires.

I.1.1.2.1. Morphologie

Le cotonnier possède une racine pivotante et ramifiée, pouvant descendre à plusieurs mètres sous la surface du sol en conditions optimales. Cette partie racinaire possède le double rôle de soutien de la plante et d'absorption des éléments nutritifs du sol.

La partie aérienne de cet arbuste est composée d'une tige principale qui, en se développant, forme des nœuds assez régulièrement espacés (Figure I-1). Des rameaux prennent naissance aux nœuds et forment deux types de branches :

- *les branches végétatives : elles partent généralement des nœuds inférieurs, elles sont présentes en nombre très variable suivant les variétés,*
- *les branches fructifères : elles prennent naissance aux nœuds supérieurs, elles portent les feuilles et les organes fructifères de la plante.*

Les feuilles du cotonnier peuvent avoir des formes et des dimensions différentes. Elles peuvent également être glabres ou pileuses, ce qui peut avoir une influence sur les impuretés retrouvées dans la fibre (notamment dans le cas de la récolte mécanique), ainsi que sur le développement de certains insectes (Deguine, 1995). Les feuilles assurent un rôle de réserve, d'assimilation, de respiration et de transpiration. Elles constituent pour l'agronome un outil de diagnostic de l'état des échanges avec le sol et de l'état de santé du cotonnier (diagnostic foliaire, (Fritz and Vallerie, 1971)).

I.1.1.2.2. Cycle du cotonnier

La date de semis des graines de cotonnier est déterminée par les conditions climatiques (température, pluviométrie). Elle varie donc d'une région de culture à une autre et peut s'étendre sur plusieurs saisons selon le climat.

Selon les variétés et les conditions du milieu, la phase de levée et le stade de plantule (Figure I-1) durent 50 à 60 jours. Elles sont suivies par l'anthèse annonçant la fin de la phase végétative et le début de la phase de floraison. Le rythme de floraison peut varier

selon les variétés et les conditions climatiques (Boulanger and Gutknecht, 1955). La pollinisation a lieu dans les quelques heures suivant l'ouverture des fleurs, la fécondation est achevée dans les trente heures qui suivent l'épanouissement de la fleur (Figure I-2-a). Certains ovules peuvent ne pas être fécondés, d'autres peuvent avorter malgré une fécondation normale. Ces derniers sont à l'origine de graines avortées, généralement appelées « motes » (Lagière, 1966).

La floraison est étalée dans le temps ; les phases de floraison et de maturation se chevauchent. La phase de maturation des capsules (fruits du cotonnier, Figure I-2-b) peut durer de 40 à 80 jours, voire plus selon la variété, les conditions de culture et la position de la capsule au sein du plant. À l'issue de cette phase, les capsules mûres s'ouvrent et le coton-graine sèche (Figure I-2-c). Le coton-graine est l'objet de la récolte ; il est constitué des graines et des fibres qu'elles portent. Des fleurs peuvent continuer à se former bien que les premières capsules soient ouvertes. C'est une caractéristique du cotonnier d'avoir à la fois des boutons floraux, des fleurs, des capsules fermées ou ouvertes au cours de son développement.

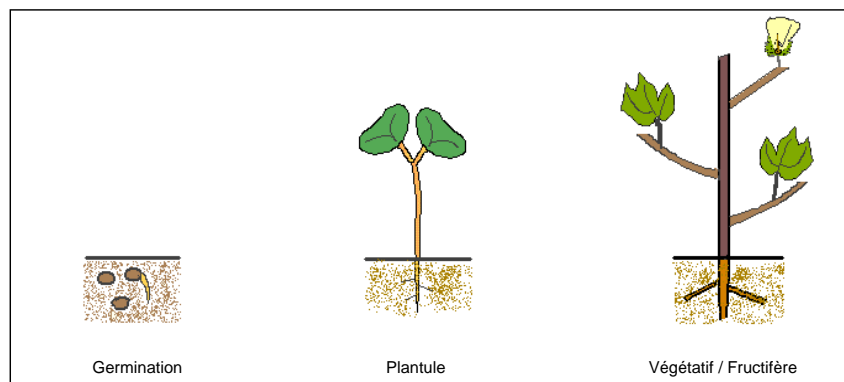


Figure I-1 : Phases de développement du cotonnier (Archives Cirad).



Figure I-2 : Développement du fruit du cotonnier *G. hirsutum* (Archives Cirad).

I.1.1.3. Conduite de la culture

La qualité d'une récolte de coton est fortement liée aux pratiques culturales de l'agriculteur. Les techniques utilisées peuvent varier considérablement suivant les conditions climatiques, la qualité du sol, les étendues des exploitations, et les moyens économiques propres à chaque zone de production. Toutefois, il existe certaines règles générales qui, selon divers auteurs, favorisent le bon développement du cotonnier (Braud and Richez, 1963; Cauquil and Vaissayre, 1971; Delattre, 1973; Lagière, 1966; Raingeard, 1968). Nous en énumérons les principales :

- la rotation culturale : permet un maintien ou une augmentation de la fertilité du sol. Elle assure, d'autre part, une défense naturelle contre certains ravageurs et certaines maladies spécifiques au cotonnier.
- Une préparation judicieuse du sol, tenant compte de ses constituants et de son état physique, procure au cotonnier des conditions favorables d'enracinement et d'épanouissement.
- La date de semis, la densité (nombre de plants par unité de surface) et la profondeur d'enfouissement des graines représentent autant de facteurs à maîtriser pour une récolte de qualité.
- Le jeune cotonnier est très sensible aux conditions du milieu dans lequel il évolue. Un bon entretien cultural (désherbage, buttage, lutte contre les ravageurs...) est donc nécessaire afin qu'il puisse se développer de façon optimale.

L'évolution des pratiques culturales tend vers la généralisation de la mécanisation. Toutefois dans les régions où les exploitations sont de petite superficie, comme c'est généralement le cas en Afrique et dans certains pays du Moyen Orient, les techniques utilisées restent manuelles.

I.1.1.3.1. La récolte

La récolte du coton-graine est effectuée 6 à 10 jours après l'ouverture des capsules. Celle-ci étant échelonnée, la récolte peut se faire en plusieurs passages et s'étaler sur un laps de temps plus ou moins important selon les variétés et les conditions de croissance de la plante. Elle doit toutefois avoir lieu avant que le coton-graine ne tombe ou qu'il ne soit sujet à des intempéries.

La récolte du coton peut être manuelle ou mécanique suivant les étendues cultivées et les moyens disponibles dans chaque pays.

La récolte manuelle fournit en général un coton-graine peu chargé en matières étrangères (Figure I-3-a). De plus, elle peut permettre une première classification de la récolte selon l'aspect de la fibre (Lagière, 1966). Cependant, ce type de ramassage est lent et nécessite une main d'œuvre importante.

Quant à la récolte mécanique, elle est de pratique courante dans les pays où les exploitations sont de grande surface. Elle permet un ramassage rapide du coton-graine, mais augmente le taux de matières étrangères, malgré l'utilisation de défoliants pour favoriser la chute des feuilles avant la récolte (Gutknecht, 1960; Roch, 1975). Il existe deux principaux types de récolteuse mécanique:

- *le « cotton stripper » (Figure I-4-a) : cette machine arrache les capsules entières, qu'elles soient ouvertes ou pas, avec en plus une quantité importante de branches, brindilles et feuilles. Pour limiter la quantité de capsules non ouvertes, certains traitements sont utilisés pour en favoriser l'éclatement avant la récolte. Le « cotton stripper » fournit du coton-graine très chargé en matières étrangères (Figure I-3-b), donc pouvant être sujet à des dépréciations lors de la classification commerciale.*
- *Le « cotton picker » (Figure I-4-b) : ne ramasse que le coton-graine des capsules ouvertes. Deux à plusieurs passages peuvent être effectués si nécessaire. Cette récolteuse est la plus répandue dans le monde et fournit un coton-graine peu chargé en matière étrangère par rapport au « cotton stripper » (Figure I-3-c).*

1.1.1.3.2. L'égrenage

Après récolte, le coton graine est directement² acheminé des exploitations vers les usines d'égrenage afin d'assurer la séparation des fibres de la graine. Le bon déroulement de cette première étape de transformation du coton, est une condition essentielle pour obtenir des fibres de la meilleure qualité possible.

Des opérations de conditionnement de la matière sont généralement nécessaires avant l'égrenage proprement dit. Dès son entrée dans le circuit d'égrenage, et suivant son taux d'humidité, le coton-graine peut subir une opération de séchage. Des opérations de nettoyage se succèdent ensuite pour assurer l'extraction des impuretés grossières et l'élimination des particules fines (sable, poussière, débris de feuilles ou de tiges...). Un second séchage ou une réhumidification peuvent éventuellement être effectués après nettoyage juste avant l'alimentation des égreneuses. Ces opérations de conditionnement ont une efficacité variable selon le type du coton graine (type de récolte, taux d'humidité...); différentes combinaisons de traitements peuvent donc être utilisées pour assurer des conditions d'égrenage favorables (Gutknecht, 1960).

À l'issue de ce conditionnement, le coton-graine poursuit son parcours dans le circuit pour atteindre les égreneuses proprement dites. Elles sont de deux types : à rouleau ou à scies. L'utilisation de l'un ou de l'autre type est fonction de la longueur des fibres et de la production de coton graine du pays.

² Un stockage de durée variable peut éventuellement précéder l'acheminement vers les usines d'égrenage.

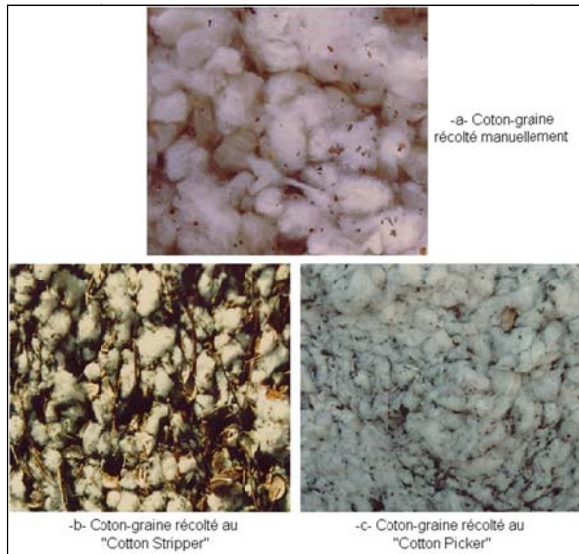


Figure I-3 : Propreté du coton-graine selon le mode de récolte (Clichés J.L.Chanselme).

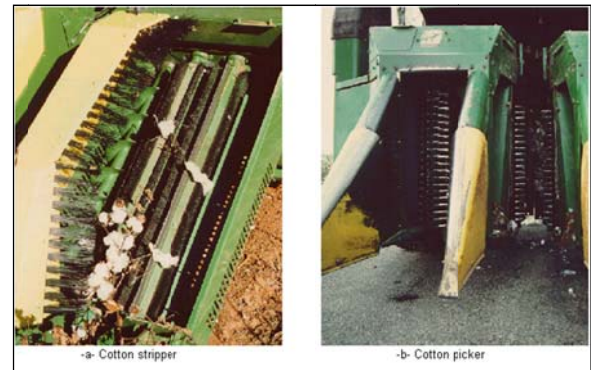


Figure I-4 : Récolteuses mécaniques (Clichés J.-L. Chanselme).

Égreneuse à rouleau

Premier type d'égreneuse industrielle, elle est apparue sous sa forme mécanisée au début du XVIII^{ème} (Figure I-5). Elle est toujours utilisée pour les cotons longue et extra-longue soie (*G. barbadense*).

Cette machine est équipée d'un rouleau tournant garni de cuir ou de matière synthétique, en contact avec le coton-graine. Deux couteaux non coupants, un fixe et un mobile, sont montés tangentielllement au rouleau du côté de l'alimentation en coton-graine. Les fibres sont entraînées par le rouleau tandis que les graines, ne pouvant pas passer entre ce dernier et le couteau fixe, sont maintenues du côté de l'alimentation. Parallèlement, le couteau mobile, animé d'un mouvement alternatif vertical, vient frapper les graines. Cette action conjuguée du rouleau tournant et du couteau mobile assure la séparation des fibres de la graine et leur acheminement vers la sortie de l'égreneuse.

L'égrenage à rouleau est peu productif (environ 50 kg par heure par égreneuse), de plus il donne un coton peu homogène (Gutknecht, 1977). Cependant, les fibres ne sont pas endommagées et leur longueur est conservée ; d'où l'avantage de ce type d'égrenage pour les soies longues.

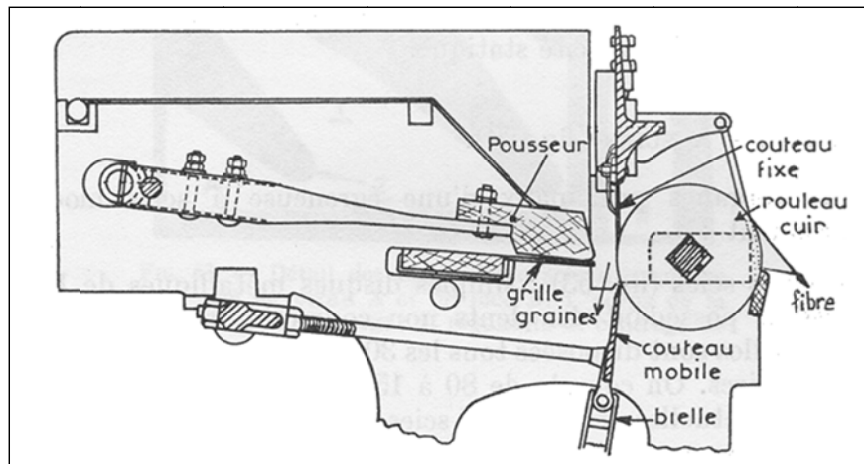


Figure I-5 : Schéma d'une égreneuse à rouleau (Parry, 1982).

Égreneuse à scies

Apparue à la fin du XVIII^{ème} siècle, l'égreneuse à scie (Figure I-6) est utilisée pour les cotons à courtes ou à moyenne soies (*G. hirsutum*) ce qui représente plus de 90% de la production mondiale.

Elle est constituée d'une série de scies circulaires, à dents non coupantes, régulièrement réparties sur un même axe et tournant au travers d'une grille. Le coton-graine est acheminé par le système d'alimentation et s'accumule sous forme d'un rouleau au contact des scies. Les dents des scies, pénétrant dans le rouleau de coton-graine, accrochent les fibres et les entraînent à travers les barreaux de la grille qui retiennent les graines. Les fibres sont ensuite détachées des scies, soit par un système de brosses, soit par jet d'air.

Ce type d'égrenage est beaucoup plus productif que le précédent (jusqu'à 2 tonnes de fibre par heure par égreneuse ; (ICAC, 1994)), la fibre qui en est issue est plus homogène du fait de la rotation du rouleau de coton-graine à l'alimentation. Toutefois, la fibre peut être endommagée et sa longueur réduite sous l'action agressive des dents des scies.

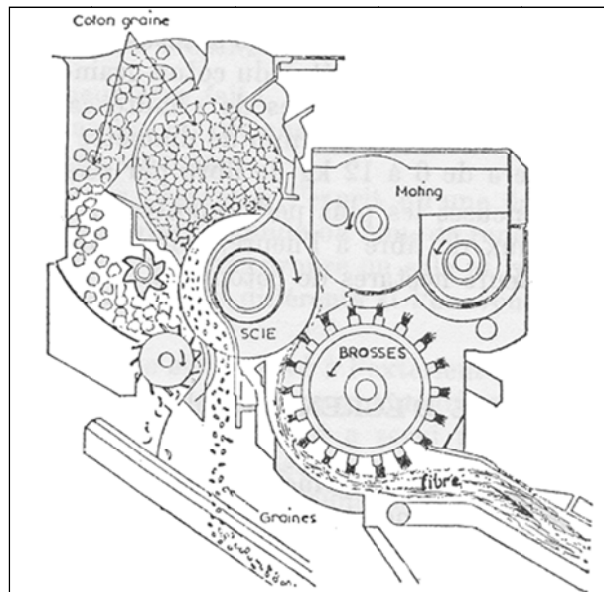


Figure I-6 : Schéma d'une égreneuse à scies (Parry, 1982).

Opérations ultérieures

Le nettoyage du coton-graine n'étant généralement pas suffisant pour obtenir une fibre avec un taux de matières étrangères acceptable, il est parfois nécessaire d'effectuer un nettoyage de la fibre après égrenage afin d'en améliorer le grade (cf. § III.2.3.1). Cette nécessité est apparue suite à la dégradation de la propreté du coton-graine à cause de la généralisation de la récolte mécanique dans certains pays producteurs (Mangialardi and Anthony, 1999). Ce nettoyage est effectué à l'aide de machines appelées « lint-cleaners » apparues en 1939, et dont l'utilisation s'est généralisée notamment aux Etats Unis.

Un à plusieurs lint-cleaners sont habituellement installés à la sortie de l'égreneuse. Ils peuvent être de deux types : pneumatique ou mécanique à cylindre garni de dents. Parmi les déchets éliminés, on trouve des débris de feuilles, des fragments de coques, des mottes et des fibres courtes.

Cette opération de nettoyage constitue un passage important dans la détermination de la qualité de la fibre et de la quantité d'impuretés qui s'y trouvent (notamment les débris de coques de graines).

À la sortie des égreneuses ou des nettoyeurs (lint-cleaner), la fibre est transportée jusqu'au condenseur qui assure l'alimentation d'une presse. Les fibres sont alors humidifiées et pressées en balles d'environ 220 kg. Des échantillons de fibres peuvent être prélevés selon diverses méthodes pour la classification commerciale. Les balles ainsi pesées, répertoriées et échantillonnées, sont stockées pour l'acheminement vers les ports d'embarquement.

I.1.2. La graine de coton

La capsule est constituée de 3 à 5 loges ; chaque loge peut contenir de 6 à 9 graines. Les graines sont de forme ovoïde (Figure I-7) et peuvent avoir des tailles différentes selon les variétés et les conditions de culture. La taille des graines est définie par un indice qui correspond à une masse de 100 graines ou « seed index ». La graine est constituée d'une amande (50 à 55% de son poids, (Lagière, 1966) enveloppée d'une coque de couleur brun-foncé ou noire (40 à 45% du poids de la graine). Selon les espèces, la coque peut être recouverte de linter ou duvet. Les graines, comme la majorité des organes aériens du cotonnier, sont naturellement pourvues de glandes à gossypol, qui est un pigment toxique pour les animaux monogastriques et pour l'homme.

La production de graines représente entre 55 et 65 % de la récolte de coton-graine. Cependant, sa valeur marchande atteint à peine 15% de celle de la récolte. Tous les constituants de la graine peuvent être séparés successivement et valorisés pour des usages variés.

Le duvet (linter) est récupéré à l'aide de machines appelées « délinteuses ». Il est exploité dans la fabrication de coton hydrophile, de rembourrage pour matelas, ou comme matière première pour diverses industries chimiques (Gautier, 1947; Lagière, 1966; Parry, 1982). Les coques sont ensuite séparées des amandes par une opération de décortilage et sont généralement utilisées comme combustible (Gautier, 1947). Les amandes restantes servent à l'extraction d'huile comestible (Gautier, 1947) ; les tourteaux qui en résultent, riches en protéines, sont utilisés pour l'alimentation des ruminants. Selon (Raymond and Marquié, 1995), la production d'huile de coton pendant la campagne 1994-1995 s'est élevée à 3,8 millions de tonnes et celle de tourteaux à 14,4 millions de tonnes.

La création de variétés de cotonnier sans glandes à gossypol (dits « glandless ») a ouvert la voie, pendant quelques années, à une exploitation des graines dans l'alimentation humaine (Bourelly, 1980; Buffet, 1979). De nouvelles possibilités de valorisation de la graine de coton sont également étudiées notamment dans le domaine de la fabrication de matériaux biodégradables (Marquié, 1996)).

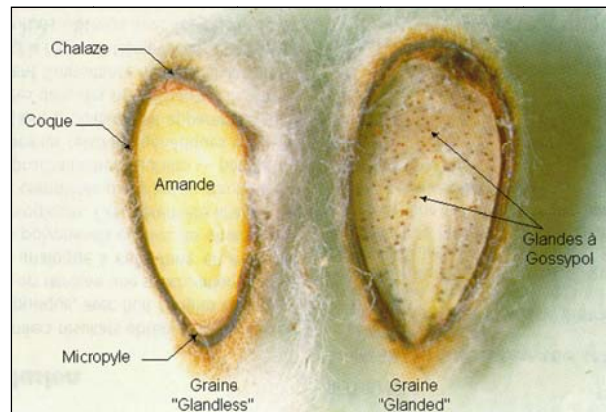


Figure I-7 : Coupe longitudinale de deux graines de coton, glanded et glandless (Archives Cirad-ca).

I.1.3. La fibre de coton et sa transformation

I.1.3.1. Formation et structure

La fibre de coton est unicellulaire ; elle se développe à partir d'une cellule de l'épiderme de l'ovule (appelée graine après maturation). Sa formation commence avant l'anthèse ((Joshi, Wadhwani et al., 1967; Lagièrre, 1966; Parry, 1982) ou le jour même de l'anthèse (Beasley, 1975; Stewart, 1975) par la différenciation de quelques cellules épidermiques au niveau de la chalaze (partie arrondie de la graine). Le processus s'étend ensuite vers le micropyle (extrémité opposée de la graine) et s'intensifie considérablement après pollinisation. (Joshi, Wadhwani et al., 1967) rapportent que l'initiation et le développement des fibres avant anthèse montre que leur formation n'est pas complètement dépendante de la fécondation et de la fertilisation de l'ovule. D'où la présence de fibres sur des graines non fécondées ou avortées (motes).

Selon Parry, les poils qui se forment dans les 5 jours après la fécondation donneront naissance aux fibres (dites lint ou soies) qui représentent le principal intérêt commercial de la culture cotonnière. Les poils qui se forment ultérieurement composeront le duvet de la graine, ou « linter », d'une longueur n'excédant pas quelques millimètres. On dénombre environ 10 000 fibres ou lint et entre 5 000 et 10 000 linters par ovule. Les fibres issues d'une même graine ont une longueur variable (Roberty, 1949). Cette variabilité serait liée au moment d'initiation de la fibre. Selon (Farr, 1931), les fibres les plus courtes sont celles dont la différenciation a été la plus tardive.

Après une rapide expansion diamétrale (entre 12 et 25 μm), les fibres, en forme de tubes creux, se développent en s'allongeant. Elles atteignent leur développement définitif entre le 18^{ème} et le 25^{ème} jour de croissance (Figure I-8). À ce stade, la paroi de la fibre est composée

de cellulose amorphe ; elle est encore mince et constitue la membrane primaire. Cette membrane possède une structure orientée transversalement conservée durant toute la période de développement de la fibre (Waterkeyn, 1987).

Le développement longitudinal de la fibre étant achevé, l'épaississement interne de la paroi cellulaire débute alors par le dépôt successif de couches cellulodiques de structure fibrillaire spiralée constituant la membrane secondaire. La cellulose ne remplit jamais complètement la fibre ; il reste un espace au centre : le lumen (Figure I-9). La phase d'épaississement s'achève au bout de 25 à 35 jours ; l'épaisseur de la paroi atteint environ 5 μm à l'ouverture de la capsule (Figure I-8). De cette épaisseur dépend la maturité de la fibre ; dans le cas d'un développement perturbé (facteurs environnementaux et/ou variétaux), la paroi reste mince ($< 2 \mu\text{m}$) et la fibre est dite immature (Figure I-10).

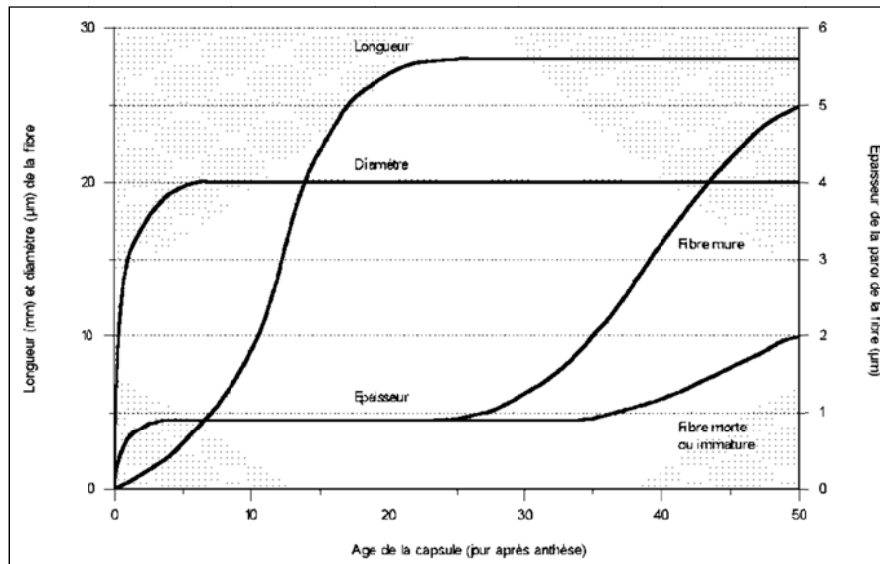


Figure I-8 : Développement de la fibre de coton à partir de l'anthèse (d'après (Roerich, 1947)).

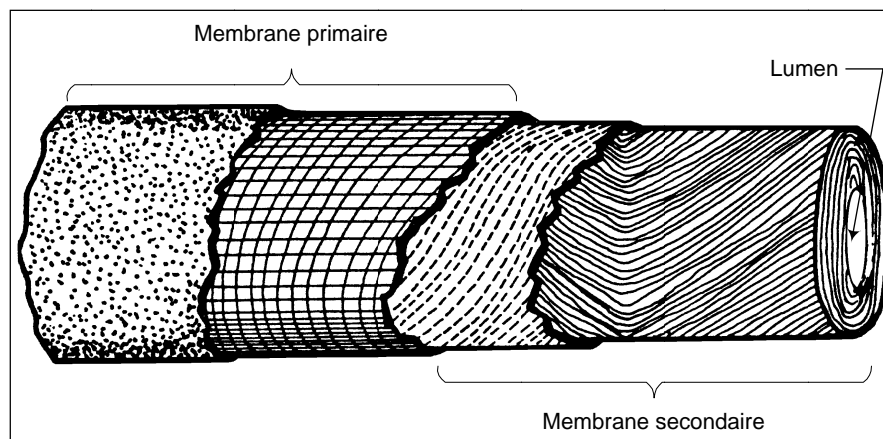


Figure I-9 : Coupe longitudinale schématique d'une fibre de coton (Parry, 1982).

Tous ces développements sont dépendants des conditions générales de nutrition des plants de cotonnier, des attaques de la culture par les insectes et les maladies. Ainsi les dépôts de cellulose ne sont pas réguliers et les fibrilles n'ont pas des longueurs et des structures identiques (Palmer, 1960).

A l'ouverture de la capsule, les fibres sèchent, s'aplatissent et se vrillent (Figure I-10, Figure I-11). A maturité, elles sont constituées d'environ 95% de cellulose ; d'autres constituants non cellulosiques (substances minérales, cires, protéines, acides pectiques et autres acides organiques) se localisent dans la membrane secondaire et dans le lumen.

Les différences de structure induisent des tensions qui s'équilibrent avant et après l'ouverture de la capsule. A ce stade, l'eau en excès est éliminée dans l'atmosphère ambiante. Toutes les tensions accumulées s'équilibrent alors en induisant un vrillage et une frisure des fibres. Notons que les étapes de croissance de la fibre sont communes (aux durées près) à toutes les espèces de cotonniers cultivées (Taha and Bourély, 1989).

La qualité du produit textile fini (filé ou étoffe) est directement liée à celle des fibres. Dès lors, la connaissance des caractéristiques physiques des fibres est un enjeu essentiel pour l'industrie cotonnière. Sachant la grande variabilité des critères de qualité de la fibre de coton et la sensibilité des équipements industriels à cette hétérogénéité, une caractérisation des fibres, suivie d'une classification, est nécessaire pour la constitution de lots homogènes pouvant être transformés dans les meilleures conditions possibles.

[Insertion d'un commentaire complémentaire par Modeste ABOE]

Une caractérisation des fibres dans des conditions bien définies et respectant les normes internationales est indispensable pour les sociétés cotonnières.

[Fin insertion d'un commentaire complémentaire par Modeste ABOE]

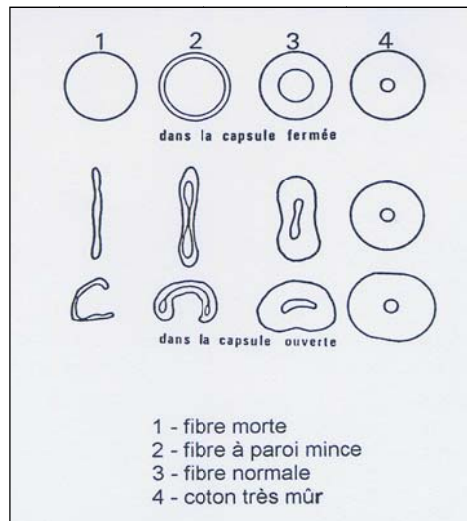


Figure I-10 : Coupe schématique de fibres immatures à très mûres ; dessèchement et aplatissement des fibres après ouverture de la capsule (Jacquemart, 1953; Roerich, 1947).

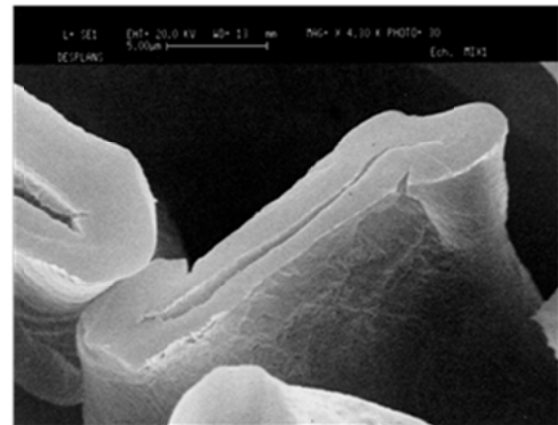


Figure I-11 : Vue microscopique de sections de fibres mûres (Desplans, 1996).

Cette classification, ou classement, détermine la valeur marchande des lots de balles de fibre de coton. Elle est effectuée sur la base de critères de qualité déterminés à partir des échantillons de fibres prélevés aux cours de l'égrenage ou sur la balle après égrenage³.

[Fin extrait tiré de la thèse de Jean-Paul GOURLOT]

I.1.3.2. Les différentes étapes de la transformation de la fibre

Chaque étape de transformation du coton-graine agit sur la qualité des fibres de coton, qui a une incidence sur la qualité et la capacité des transformations ultérieures. Aussi, comme les normes ISO 9000 le requièrent, chaque intervenant dans la filière doit s'assurer de la qualité des matières premières qu'il acquière (en entrée) et de la qualité des produits qu'il manufacture (en sortie).

L'étude de l'organisation de la filière textile (Figure I-12, extraite de (Gourlot, 1999) montre qu'un nombre important d'étapes de transformation est appliqué aux matières premières avant de parvenir chez le consommateur final. Le consommateur final attend des 'qualités' spécifiques pour chacun des produits manufacturés.

³ Nous en parlerons dans le chapitre III (Note ajoutée par Modeste ABOE).

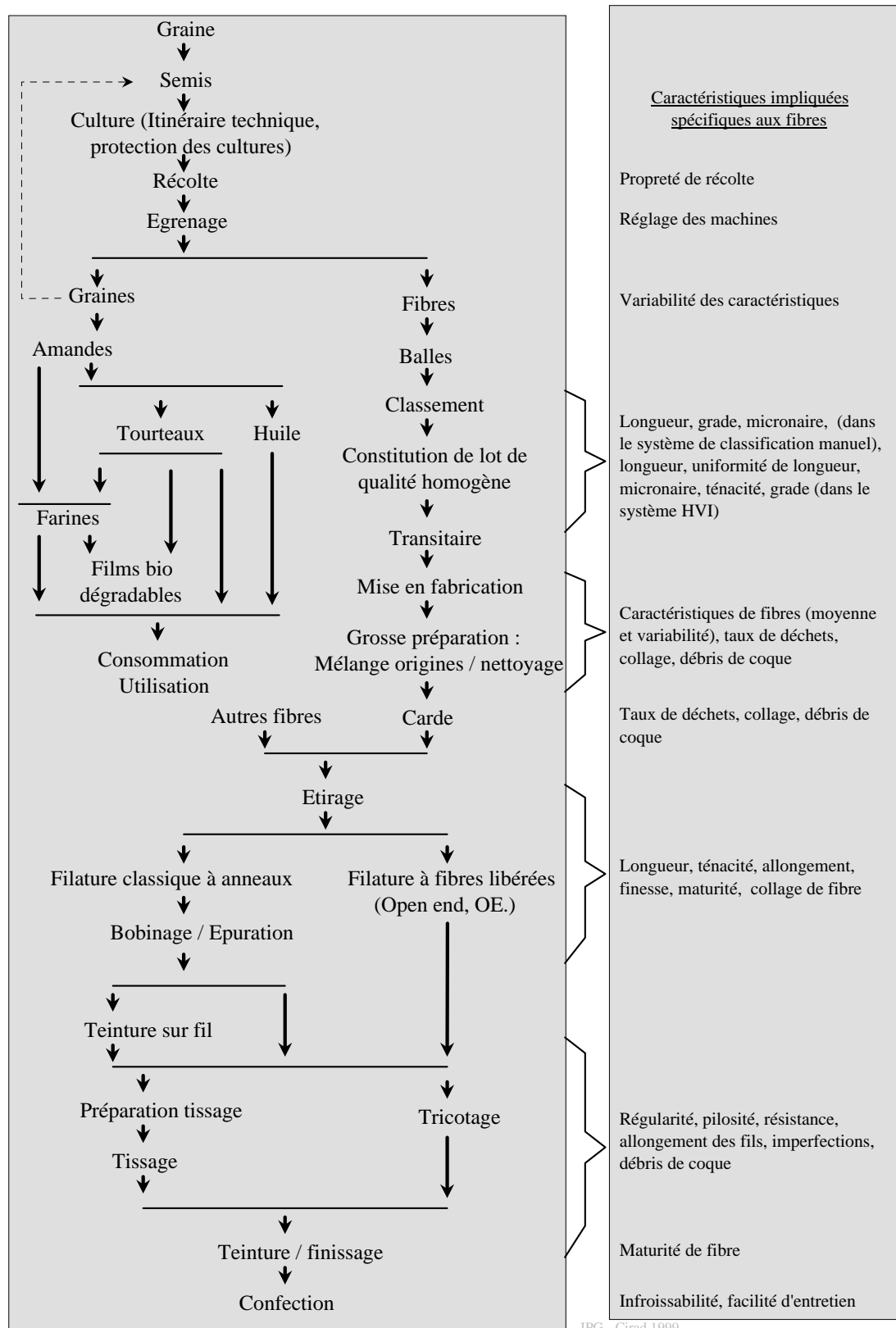


Figure I-12 : Schéma de l'organisation de la filière textile (Gourlot, 1999).

Les étapes importantes en termes de caractérisation des fibres débutent dès la fin de l'égrenage quand les fibres sont compressées en balles d'environ 225 kg. A ce moment, un ou plusieurs échantillons sont prélevés, généralement avec un emporte-pièce, pour constituer des échantillons nommés 'échantillons au sabot'. Ceux-ci sont transférés vers un laboratoire où une caractérisation des fibres est réalisée soit manuellement et visuellement soit de manière instrumentale (voir développement dans le Chapitre III).

En fonction des résultats d'analyse des échantillons, le producteur regroupe les balles de fibres par qualité homogène selon la demande du transitaire.

Les balles sont alors expédiées vers les lieux de transformation dont la chaîne se présente comme suit.

1.1.3.2.1. La filature

Cette première étape de la transformation permet de passer des flocons de fibres (présentant une structure très désorganisée) au fil (de structure linéaire et cohérente).

La fibre passe successivement par cinq étapes :

- l'ouverture et le mélange des balles en fonction de la qualité du fil attendu,
- le nettoyage plus ou moins complet des éléments non fibreux d'origine végétale, organique ou minérale,
- le cardage qui réalise un nettoyage plus poussé et individualise les fibres par l'action de fines dentures, et produit un voile puis un ruban de carde,
- l'étirage qui homogénéise et aligne les fibres,
- la filature proprement dite, donne un nouvel étirage pour affiner encore le ruban, puis, une torsion pour apporter la cohésion et la structure du fil. Le fil fabriqué est renvidé sur un support (bobine). Les procédés mis en œuvre lors de cette étape sont principalement la filature à anneau (ring spinning) et la filature à rotor, dite à bout libéré (open-end spinning). D'autres techniques existent, mais elles sont moins largement répandues.

1.1.3.2.2. Le tissage et le tricotage

Le fil brut, issu de filature, subit plusieurs transformations : tissage ou tricotage, puis finition. La mise en œuvre de chacune de ces transformations est fonction de l'utilisation finale du produit textile.

Le tissage permet la fabrication d'une étoffe par l'entrecroisement de fils de chaîne (dans le sens de la longueur) et de fils de trame (dans celui de la largeur). Cette opération se déroule en trois étapes :

- l'ourdissage, durant lequel plusieurs milliers de fils sont parallélisés et enroulés sur un cylindre pour former la future chaîne ;
- l'encollage, au cours duquel ces fils transitent par un bain d'amidon ou assimilés puis sont séchés pour réduire leur pilosité et les frictions lors du tissage ;
- le tissage proprement dit permet d'insérer la trame dans la largeur de la chaîne ; les métiers les plus rapides imposent de fortes contraintes aux fils. Ceux-ci doivent alors posséder des caractéristiques de résistance et d'uniformité adéquates en lien avec les caractéristiques intrinsèques des fibres de coton.
- le tricotage consiste à créer des boucles grâce à des aiguilles à partir d'un fil continu, et à les joindre entre elles pour former une étoffe. Le tricotage demande une moindre préparation que le tissage puisque le fil écru ne subit que l'adjonction de cires ou de lubrifiant, afin de réduire les frottements.

1.1.3.2.3. La finition et la confection

La finition, appliquée aux étoffes brutes, leur permet d'acquérir des caractéristiques adaptées à leur utilisation finale. Il s'agit :

- du brûlage, du désencollage, du décapage et du blanchiment, qui permettent respectivement d'éliminer la pilosité, de dissoudre l'amidon, de détruire les cires et autres impuretés, et de blanchir l'étoffe ;
- de la mercerisation, qui provoque un gonflement des fibres dont la section s'arrondit et qui prennent un aspect lustré. Les tissus mercerisés sont plus compacts et plus résistants que ceux n'ayant pas subi cette opération ;
- de la teinture et de l'impression : la première permet d'appliquer une couleur uniforme au tissu (ou directement au fil), la seconde permet la réalisation de motifs plus ou moins complexes ; la prise de couleur du tissu repose sur l'affinité du colorant avec certaines parties de la cellulose de la fibre (groupes hydroxyles) ; cette affinité est réduite pour les fibres immatures (en l'absence de mercerisation) en lien avec les caractéristiques intrinsèques des fibres de coton et pour les impuretés non cellulosiques encore présentes à ce stade ;
- de traitements spéciaux par l'action de résines pour faciliter l'entretien ultérieur des étoffes (infroissabilité, imperméabilité, etc...).

La dernière étape de la chaîne est la confection des produits commercialisés au grand public.

Afin de gérer ses conditions de production (qualité et productivité), chacun des maillons de cette chaîne s'est doté de méthodes, d'outils, d'appareils de mesure de certaines caractéristiques des produits. Les producteurs de fibres doivent s'adapter aux exigences des étapes ultérieures. Afin de promouvoir leurs productions, et défendre leur part de marché, les producteurs de coton utilisent divers instruments de caractérisation de la fibre que nous allons décrire dans le Chapitre III.

I.2. Organisation et activités de production des filières cotonnières en AOC

I.2.1. Activités de recherche

Les structures de recherche des pays de l'AOC visent à l'amélioration quantitative et qualitative de la production en mettant les technologies nécessaires à la disposition des acteurs de la filière. Ces structures de recherche coton et fibre sélectionnent des variétés de coton et mettent au point des itinéraires techniques de culture qui satisfont à la fois aux besoins des cotonculteurs, des égreneurs et des utilisateurs des fibres. Elles se positionnent tout au début de la chaîne de production pour assurer la bonne productivité et la bonne qualité de la culture cotonnière.

Ainsi, l'amélioration dans les pratiques de la culture cotonnière est tributaire de la qualité des technologies mises au point par les structures de recherches. Ces structures bénéficient d'un mécanisme de financement qui varie d'un pays à l'autre et qui n'est pas toujours bien explicité. Dans la plupart des pays (Bénin, Cameroun et Mali), l'Etat, qui au lendemain des indépendances avait nationalisé la recherche, se désengage progressivement. Il se charge principalement de mettre à la disposition de la recherche du personnel qualifié dont il assure encore les émoluments (salaire et autres rémunérations) ; les autres charges sont prises en compte par l'interprofession et/ou par les sociétés cotonnières (Fok and Tazi, 2003).

C'est grâce aux progrès apportés par les structures de recherche que de nouvelles variétés sont créées et que d'autres itinéraires techniques sont mis en évidence pour améliorer la productivité et la qualité globale de la production cotonnière. L'amélioration de la qualité des fibres est alors constatée lors du classement manuel, visuel et/ou instrumental des fibres.

I.2.2. Organisation et appui technique aux cotonculteurs

En Afrique, les cotonculteurs sont organisés en associations faîtières de paysans depuis la base (souvent niveau village) jusqu'au sommet (niveau régional ou national). Ces associations jouent un double rôle : i) administratif dans le suivi et la coordination des

activités et ii) syndical dans la défense des intérêts de leurs membres auprès de l'Etat d'une part, et des autres acteurs d'autre part. Les paysans assurent la production du coton-graine qu'ils vendent aux égreneurs qui en deviennent propriétaire. Pour réaliser leur production, les cotonculteurs bénéficient d'appuis techniques et d'encadrements des services spécialisés de l'Etat/interprofession (Bénin), de la société cotonnière (Burkina) ou des compagnies d'égrenage (Côte d'Ivoire par zone géographique).

L'appui technique aux organisations paysannes tend à revenir aux sociétés cotonnières surtout dans les pays où les compagnies ont des monopoles géographiques (Côte d'Ivoire, Burkina). Si au Bénin, l'Etat et l'AIC (interprofession) prennent une part active dans la vulgarisation des résultats de la recherche grâce à un personnel spécialisé, c'est la société cotonnière nationale qui assure cette activité dans d'autres pays (Sénégal, Tchad et Togo). Partout les cotonculteurs à travers les associations de paysans participent techniquement et activement à l'encadrement. Pour ce faire, elles bénéficient d'appuis techniques et financiers de la part des structures compétentes de l'Etat (Cameroun et Mali), de l'interprofession (Bénin et Côte-D'ivoire) ou de la société cotonnière (Togo, Tchad et Sénégal).

Avec cet encadrement, les apports de la recherche sont transmis aux producteurs de coton. Ainsi les pratiques améliorées de production peuvent déboucher sur une production accrue et sur une qualité constatable lors du classement des fibres produites.

I.2.3. Production et acheminement du coton-graine vers les usines d'égrenage

La production en quantité et en qualité du coton-graine repose sur la qualité des semences produites et distribuées, la mise en œuvre d'une bonne pratique culturale et la bonne organisation de l'activité de commercialisation primaire.

I.2.3.1. Production et distribution des semences

En Afrique de l'Ouest et du Centre, le secteur des semences reste un domaine d'activité de l'Etat ou de l'Interprofession de coton selon les pays. Le choix variétal relève d'un arbitrage entre les intérêts des différents acteurs concernés (cotonculteurs, égreneur et les exportateurs). Les semences sont encore distribuées gratuitement dans la plupart des pays grâce à un mécanisme de prêt de campagne réalisé au moment de l'achat du coton-graine aux paysans (Bérout, Ayena et al., 2001). L'activité implique des « producteurs semenciers » engagés dans des contrats de production et de livraison de semences avec la structure en charge ou la « société semencière » selon le cas. Les semences sont donc produites et distribuées par le biais de réseau de producteurs.

I.2.3.2. Pratiques culturelles

Les exploitations dans les pays d'AOC sont caractérisées par leurs petites tailles et leur nombre s'accroît d'année en année. Les exploitations agricoles sont artisanales. La main-d'œuvre est familiale et les terres sont cultivées grâce à des dabas et des houes. L'introduction de la culture attelée permet maintenant de travailler avec les charrues, les multiculteurs, les charrettes, mais cette pratique n'est encore utilisée que dans quelques rares cas de grandes exploitations (20 à 30 ha). Ainsi la culture cotonnière est essentiellement artisanale et extensive. Si aux Etats-Unis, 12 heures de travail suffisent pour un hectare de coton, il faudrait 80 à 100 jours de travail en Afrique Zone Franc (Fok, 1993). Hormis la récolte mécanique qui souille le coton-graine, la rapidité dans l'exécution des tâches grâce aux nouvelles technologies est un avantage comparatif dans l'efficacité des opérations.

La récolte en Afrique de l'Ouest et du Centre est manuelle, elle est faite au moins en deux passages. On procède à un premier passage lorsque 50% environ des capsules sont ouvertes et à un second passage lorsque toutes les capsules sont ouvertes.

Pour récolter, l'opérateur est muni de deux sacs attachés en bandoulière, il marche dans l'inter-ligne en utilisant ses deux mains pour récolter le coton de chaque côté, il évite d'incorporer les corps étrangers et autres impuretés y compris les 'quartiers d'orange'. Un opérateur peut récolter de 30 à 50 kg/ jour. Les sacs en coton sont recommandés alors que les sacs en polypropylène doivent être prohibés (Crétenet and Dessauw, 2006). Cette méthode de récolte préserve forcément la qualité du coton et évite toute contamination.

I.2.3.3. Commercialisation primaire et acheminement du coton graine vers les usines d'égrenage

La commercialisation primaire est une étape post-récolte dans la chaîne de production. Le coton-graine récolté par les cotonculteurs est en général trié en deux voire trois catégories de qualité de coton-graine selon les pays (premier, deuxième et troisième choix) et envoyé sur le marché d'achat. Le marché doit être accessible aux camions et nettoyé soigneusement pour éviter les contaminations. Les productions des différents cotonculteurs sont pesées et évaluées pour leur qualité de coton-graine. Toutes les informations comme les références des ballots pesés, leur poids et leur origine, la variété et la génération de multiplication sont enregistrées et cosignées par le cotonculteurs et le responsable du marché d'achat.

Le coton-graine de premier choix est chargé, damé et transporté en premier vers l'usine d'égrenage. Si différentes qualités doivent être chargées dans le même camion, on prend soin de les séparer. Chaque caisse dispose d'un écriteau renseignant l'usine sur l'origine du coton-graine (village, marché d'achat), la variété et la génération de multiplication de la variété, le poids approximatif du coton graine chargé et sa catégorie commerciale (Crétenet and Dessauw, 2006). Le coton-graine des différents marchés d'achat se trouvant dans le bassin d'approvisionnement d'une usine d'égrenage est transporté vers celle-ci par camion.

Ainsi, la qualité des semences, les pratiques culturales et l'organisation des marchés d'achat du coton-graine ont un impact direct sur la qualité du coton-graine qui est acheminé à l'usine d'égrenage. La gestion du coton-graine, depuis le marché d'achat jusque dans l'usine d'égrenage, joue un rôle essentiel sur la qualité moyenne des fibres et sur son homogénéité intra et inter-balle au sein des lots de balles constitués pour la commercialisation des fibres (Ce point sera développé dans les Chapitres IV et V).

I.2.4. Egrenage du coton-graine et transport des échantillons vers les centres de classement

L'égrenage du coton-graine consiste en une séparation des fibres et des graines. Différents traitements de nettoyage du coton-graine et des fibres sont également réalisés afin d'éliminer un maximum d'impuretés préjudiciables à la qualité perçue par les clients. Toutefois, un nettoyage trop poussé peut endommager les fibres et en diminuer la qualité.

A l'issue du processus d'égrenage, les fibres sont conditionnées dans des balles de coton de dimensions standardisées, avec des emballages en tissu coton ou en polypropylène⁴ selon les pays.

Au cours de la campagne 2009-2010, nous avons dénombré 90 usines d'égrenage en AOC. Les usines sont équipées de matériel américain (*Lummus* ou *Continental*) avec des égreneuses à scies. Différentes générations d'usines sont installées : plus ou moins grandes, plus vétustes ou récentes, équipées ou non de *lint Cleaner*, avec ou sans assécheur ou humidificateurs de coton-graine et de fibre. Le Bénin, le Burkina Faso et le Mali comptent les plus grands nombres d'usines d'égrenage et disposent chacun d'une capacité d'égrenage d'environ 600 000 tonnes par campagne.

⁴ Les toiles en polypropylène utilisées pour préserver les balles de coton sont désormais prohibées parce qu'elles contaminent les fibres. On les remplace par des toiles de coton ou des emballages en polyéthylène colorés.

Pour permettre l'évaluation des caractéristiques des fibres, des échantillons de fibres sont prélevés par des 'sabots' en bas des balles au moment de leur pressage (Figure I-13). Les échantillons sont récupérés quand la balle est extraite de la presse (Figure I-14). Ces échantillons sont arrangés dans des pochettes par ordre croissant de leur prélèvement et, à la fin de la journée, l'ensemble des pochettes est mis en colis et acheminé vers les centres de classement.

L'égrenage du coton-graine est donc une étape très importante dans la chaîne de production car elle a une grande influence sur la qualité de la fibre, laquelle est observable au classement.



Figure I-13 : Exemple de dispositif coupant 'cutter' pour effectuer le prélèvement des échantillons de fibres dans les balles de coton au moment du pressage de la balle (Cliché J.-P. Gourlot).



Figure I-14 : Echantillon prélevé dans une balle suite à son découpage au sabot (d'où le nom d'échantillon au sabot) : L'échantillon au sabot sur une balle à sa sortie de l'usine est situé en bas de la balle (Cliché M. Aboé).

I.2.5. Organisation du classement de la fibre

A leur arrivée dans les centres de classement, les échantillons sont généralement stockés dans des salles de pré-conditionnement pendant quelques heures avant d'être acheminés soit au laboratoire de technologie soit à la salle de classement manuel et visuel. Les résultats ainsi obtenus des centres de classement des fibres permettent de marquer les balles, en y indiquant la « classe de longueur », le « type de vente » et l' « origine » (village et usine d'égrenage). Les pratiques des classements sont développées dans le Chapitre III.

Les structures de classement des fibres de coton sont placées sous la tutelle de l'interprofession dans certains pays (AIC /Bénin et Intercoton / Côte d'Ivoire, Mali) ou sous la responsabilité des compagnies cotonnières elles-mêmes (Sénégal, Cameroun, Togo, Burkina Faso et Tchad). Dans ce dernier cas, les compagnies reçoivent une dérogation de l'Etat pour le classement des fibres. Dans tous les cas, l'activité de classement des fibres reste sous le contrôle régalien de l'Etat.

Nous rappelons que seul le classement manuel et visuel est pratiqué jusqu'à nos jours en AOC. Les analyses technologiques faites sur quelques échantillons de balles dans certains pays permettent seulement d'avoir une idée de grandeur des paramètres technologiques. Ces analyses sont également faites sur demande des Structures de Recherches dans le cadre de leurs activités.

I.2.6. Stratégie de vente des fibres AOC et transport des balles vers les ports

Les industries textiles localement implantée bénéficient d'une priorité d'accès aux fibres de coton dans certains pays de l'AOC pour leur permettre de bien fonctionner.

Les ventes de coton sont réalisées soit par anticipation, soit au fur et à mesure de la campagne pour de petites quantités renouvelables périodiquement. Les sociétés cotonnières ciblent un portefeuille diversifié de clients; en Afrique il s'agit principalement de négociants avec lesquels elles signent des contrats de vente. Les négociants à leur tour vendent les fibres aux filateurs.

Des ventes sont également pratiquées en contrepartie d'un préfinancement d'achat de coton-graine pour pallier à d'éventuelles difficultés de financement sur le marché domestique, en particulier pour la couverture des achats de coton-graine.

Les balles de fibres sont transportées vers les ports d'exportation par des transporteurs privés regroupés en syndicats. Notons que ces transports peuvent se faire avec des camions issus des circuits de vente de véhicules d'occasion. Cela peut entraîner des désagréments comme des retards dans l'achèvement des produits, des pertes de chargements et des détériorations de la qualité des produits du fait d'une mauvaise protection du coton pendant le transport.

I.3. Statistiques de production cotonnière

I.3.1. A travers le monde

Le coton est récolté sur une superficie de plus de 30 millions d'hectares, répartis sur environ 70 pays (Figure I-15). La fibre de coton représente 80% de la valeur marchande du coton. Depuis les années 1945, la production n'a cessé d'augmenter grâce à une amélioration du rendement moyen en fibre qui est passé de 210kg de fibre/ha en 1945/46 à 727 kg de fibre en 2009/2010 (ICAC, 2010). La production mondiale avoisine les 20 à 27 millions de tonnes (ICAC, 2010). Pour 2009/2010, la production mondiale de fibre est de 21,966 millions de tonnes et, selon les projections de (ICAC, 2010), cette production sera de 25,185 en 2010/2011. Six pays assurent plus de 85% de la production mondiale; il s'agit de la Chine, de l'Inde, des Etats-Unis d'Amérique, du Pakistan, du Brésil et de l'Ouzbékistan (Figure I-17). Parmi ces pays, seuls les Etats-Unis, l'Inde et l'Ouzbékistan exportent une part importante de leur production mondiale de coton fibre. L'Afrique zone CFA est quatrième exportateur mondial avec un pourcentage d'exportation de 6,97% (Figure I-17).

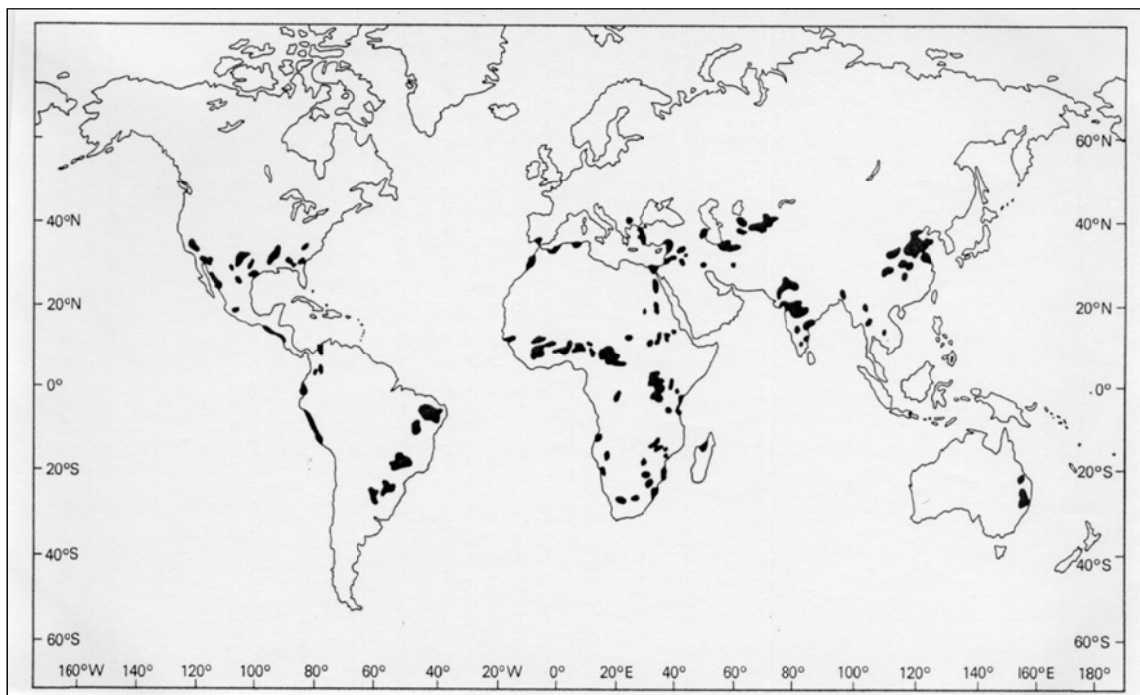


Figure I-15 : Zones de culture cotonnière dans le monde (d'après Matthews, 1989).

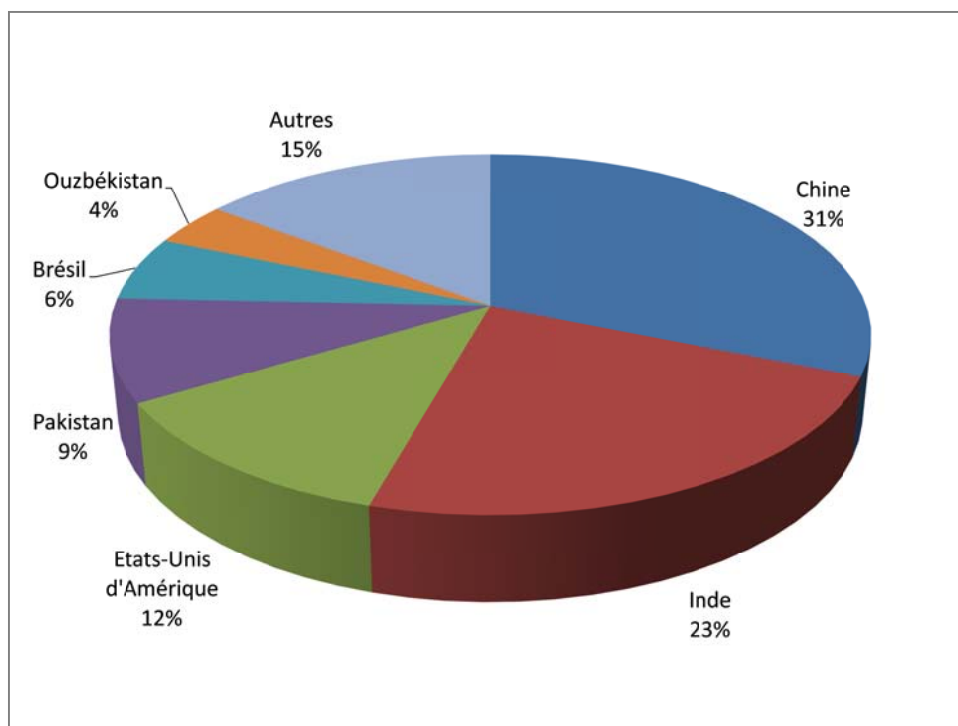


Figure I-16 : Répartitions des productions de fibres entre pays, source (ICAC, 2010).

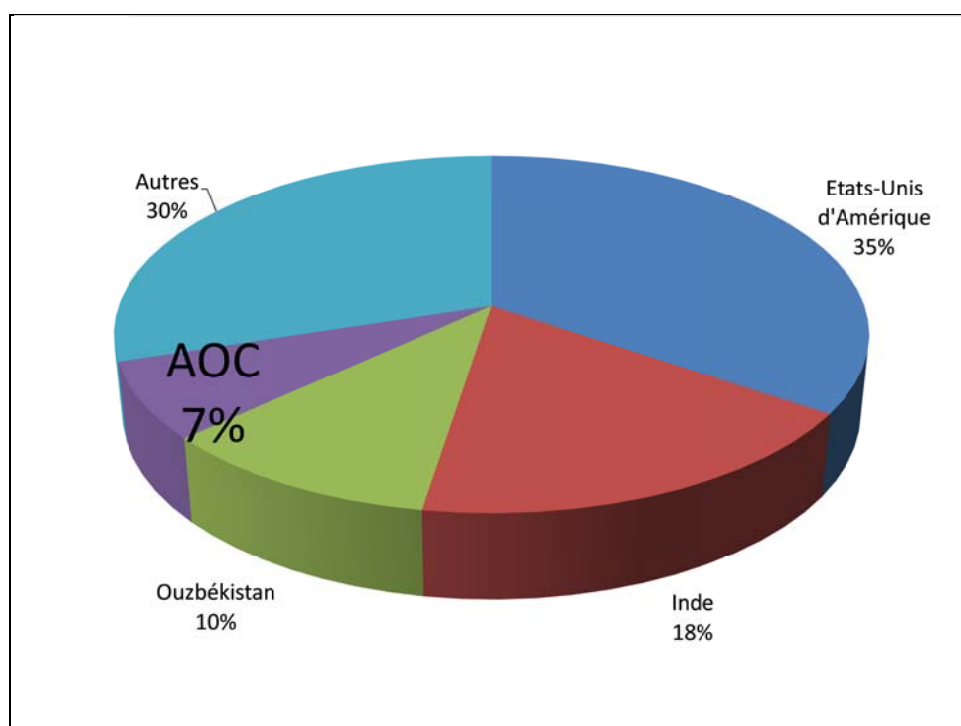


Figure I-17 : Répartition des exportations, source (ICAC, 2010).

I.3.2. En Afrique et particulièrement en AOC

Le coton est cultivé en Afrique sur une superficie de plus de trois millions d'hectares, avec une production de plus d'un million de tonnes de fibres en 2009/2010 (ICAC, 2010). Sept pays (Burkina Faso, Zimbabwe, Egypte, Mali, Tanzanie, Côte d'Ivoire et Bénin) assurent plus de 70% de la production africaine.

Les huit pays de la région couverte par notre étude en AOC (Bénin, Burkina Faso, Cameroun, Côte d'Ivoire, Mali, Sénégal, Tchad et Togo) représentent près de 50% de la production africaine en 2009/2010 (Figure I-18). L'évolution des productions dans ces pays est représentée dans la Figure I-19. Ils produisent plus de 99% de la part zone CFA et exportent presque la totalité de leur production. La qualité de cette production est estimée de manière visuelle et manuelle ; l'enjeu pour ces producteurs est de parvenir maintenant à classer ces productions de manière instrumentale. Plus de quatre millions de balles doivent ainsi être classées de manière instrumentale et les conditions opératoires de ces analyses doivent être précisées.

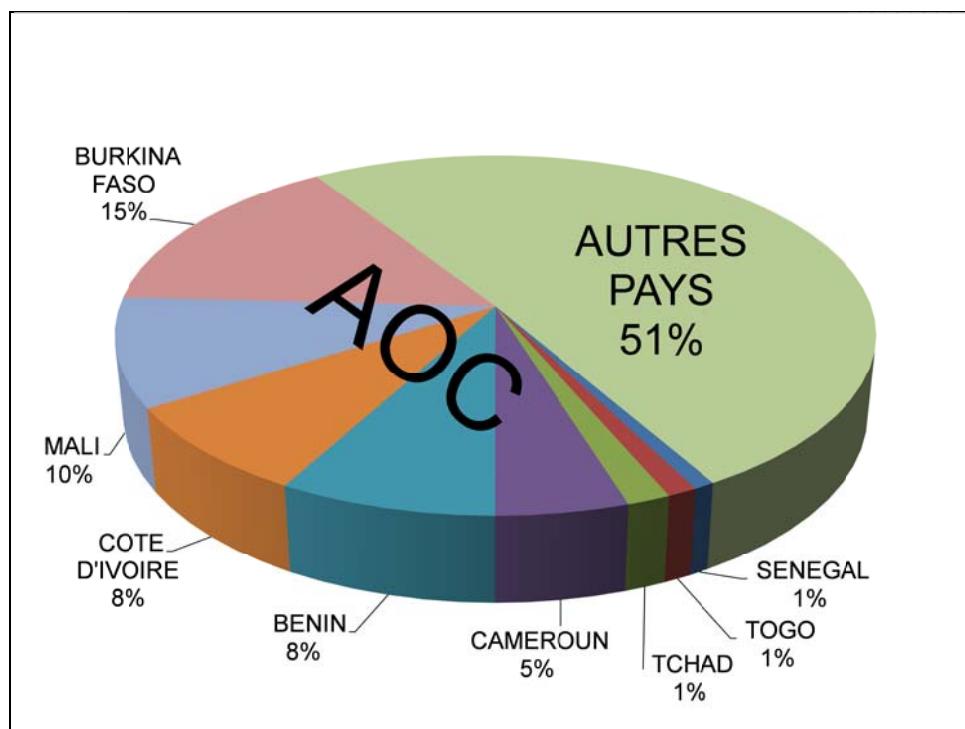


Figure I-18 : Parts respectives des productions en Afrique, source (ICAC, 2010).

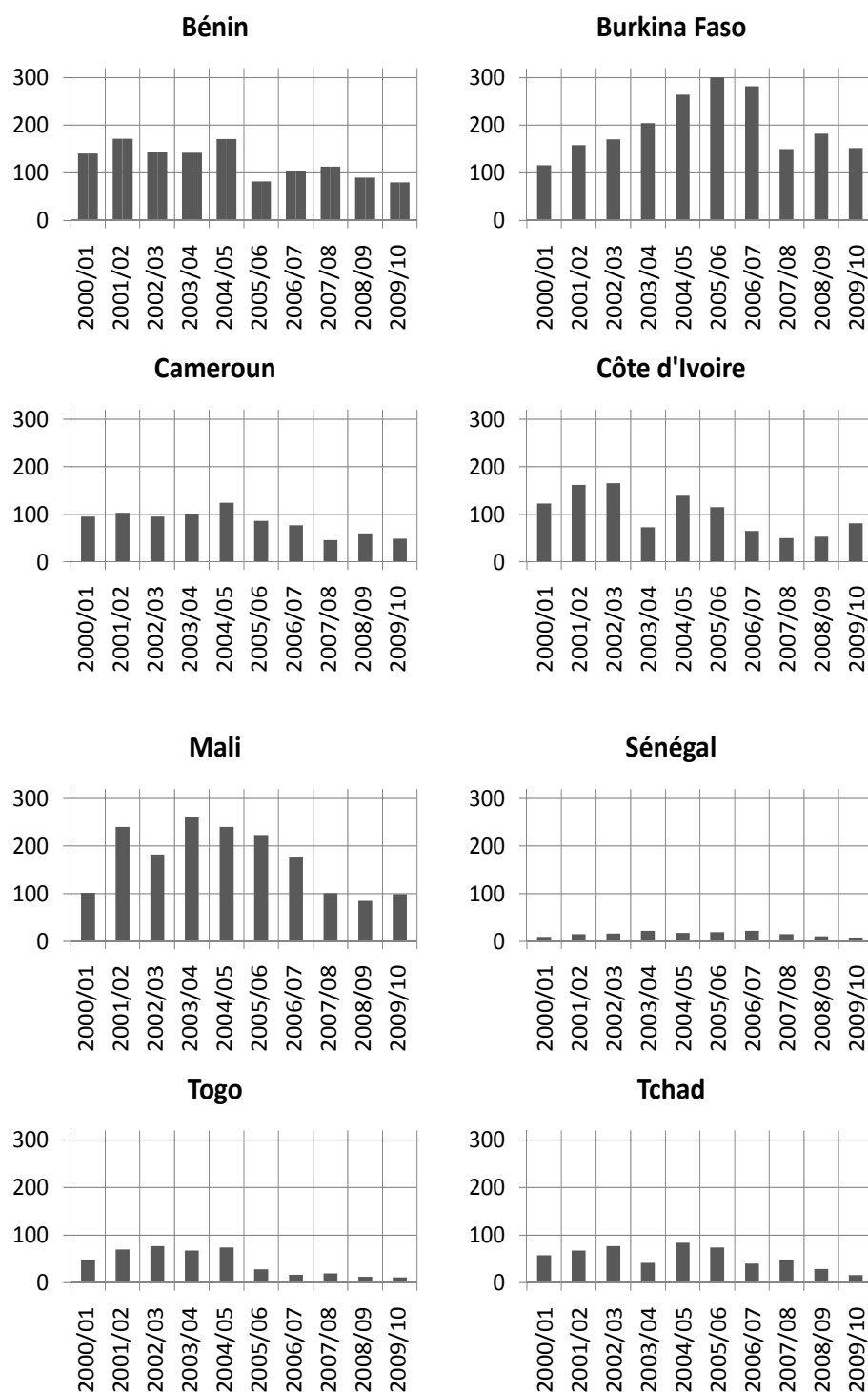


Figure I-19 : Productions (x 1000 tonnes) sur les dix dernières années des huit pays de l'AOC source (ICAC, 2010).

Chapitre II

Problématique de la recherche, objectifs et hypothèses

Chapitre II. Problématique de la recherche, objectifs et hypothèses

II.1. Problématique de la recherche

Le cotonnier est une culture d'exportation importante pour de nombreux pays d'Afrique. La fibre de coton se négocie sur un marché mondial très tendu où la qualité est un facteur déterminant du prix. Cette qualité s'estime à partir de la mesure des caractéristiques technologiques qui reflètent son aptitude à la transformation industrielle en tissu. La balle de coton, d'une masse d'environ 225 kg, est l'unité élémentaire de commercialisation, mais les contrats portent généralement sur des lots de plusieurs dizaines de balles (Figure II-1), de caractéristiques technologiques suffisamment homogènes.



Figure II-1 : Exemple de lot de balles (Cliché par M. Aboé).

Dans les pays développés producteurs de coton, ces caractéristiques sont mesurées à l'aide des instruments de laboratoire sur un prélèvement dans chaque balle. Les normes d'échantillonnage et d'analyse utilisées permettent aux estimations de représenter la caractéristique moyenne d'une balle avec une marge d'erreur raisonnable et un risque limité de litige commercial. La culture mécanisée du coton dans ces pays se conduit sur de grandes parcelles (Figure II-2-a) ayant la réputation de permettre la production de lots de balles homogènes en qualité.

En Afrique au contraire, la production est faite par des agriculteurs sur de petites parcelles (Figure II-2-b). Ainsi, de petites quantités de coton-graine sont produites et livrées au marché primaire et regroupées avant égrenage. Il peut en résulter une plus forte variabilité de la qualité à l'intérieur des balles africaines. Cela peut donc inciter à remettre en cause les normes d'échantillonnage et d'analyse élaborées dans les pays développés pour des balles homogènes quant à leur application en Afrique. L'inexistence de normes applicables en Afrique est un des obstacles à la généralisation des mesures systématiques de la qualité. Il se traduit généralement par un désavantage commercial pour les cotons d'Afrique car le client fait payer le risque qu'il prend sur la qualité par une décote financière à l'achat.

Dans le but de favoriser la commercialisation du coton africain il est indispensable de mettre en place des méthodes et procédures d'analyse adaptées aux conditions africaines. Ces méthodes et procédure doivent garantir la fiabilité des résultats et respecter des tolérances internationales reconnues.

Cette conception requière une bonne évaluation du niveau de variabilité intra et inter balles des caractéristiques technologiques de la fibre de coton, en particulier les six recommandées par le *Commercial Standardization of Instrument Testing of Cotton* (CSITC): le Micronaire (Mic) sans unité, la longueur *Upper Half Mean Length* (UHML) exprimée en millimètres (mm), l'uniformité de la longueur (UI) exprimée en pourcentage, la ténacité (Str) exprimée en g/tex~cN/tex, la réflectance (Rd) exprimée en pourcentage et l'indice de jaune (+b ou X.b) sans unité.

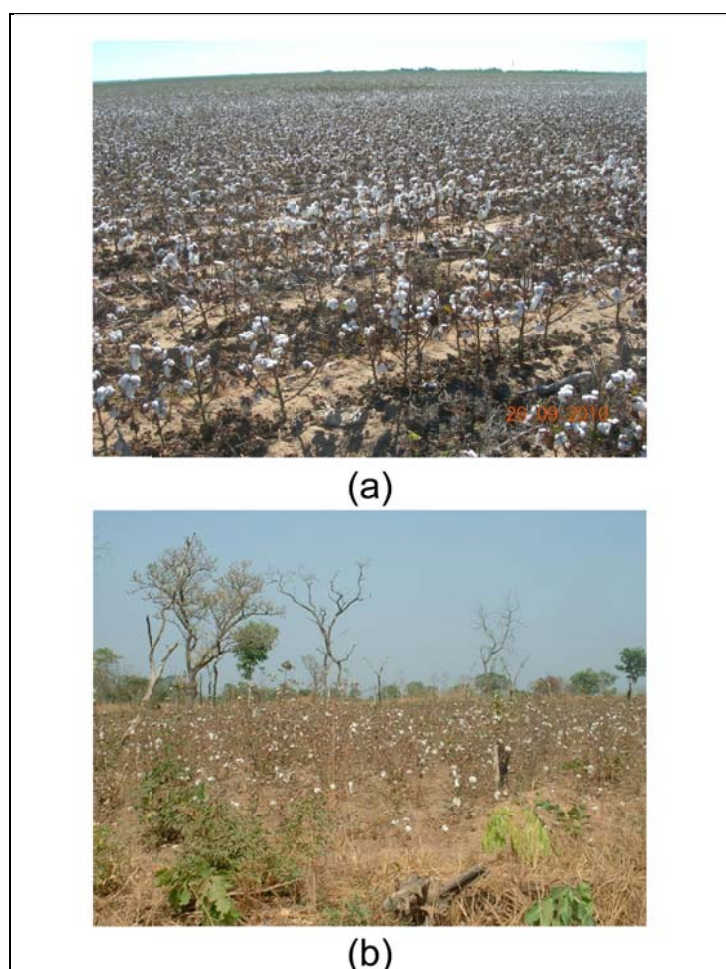


Figure II-2 : Exemples de champs de coton en culture mécanisée (a) et en culture extensive (b) (Archives Cirad).

II.2. Objectifs de la recherche

L'objectif général de cette étude est d'estimer la variabilité intra-balle et inter-balle de chacune des six caractéristiques technologiques des fibres de coton, dans des bassins de production représentatifs de huit pays de l'Afrique de l'Ouest et du Centre (Figure II-3).

Deux objectifs spécifiques sont à atteindre : (1) Le premier est d'établir la méthodologie d'échantillonnage en indiquant le nombre de prélèvements de sabot à effectuer sur la balle et à quel endroit de celle-ci; (2) Le second objectif spécifique est d'établir les procédures d'analyse des échantillons prélevés sur une chaîne de mesure instrumentale (CMI) et qui permettent de garantir le respect des tolérances de mesure des différentes caractéristiques telles qu'elles sont admises dans les échanges internationaux de fibres.

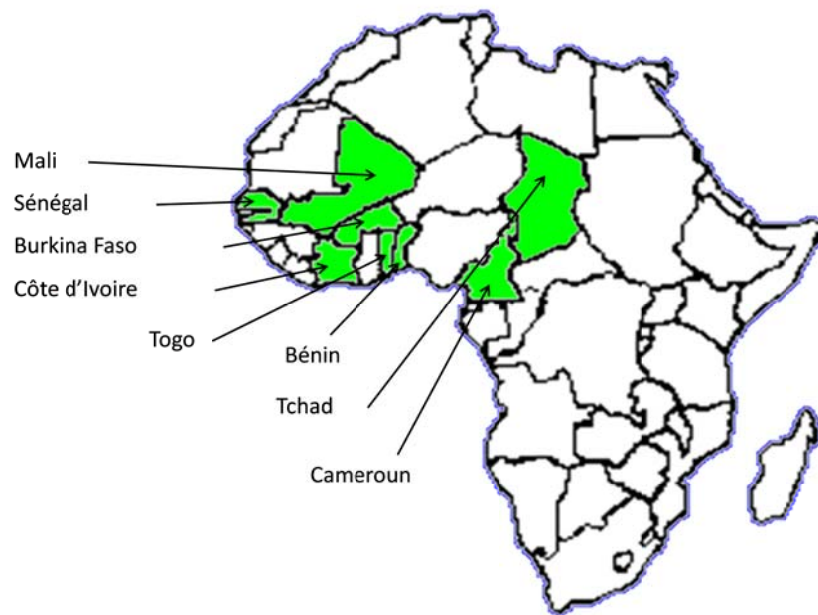


Figure II-3 : Carte d'Afrique et mise en évidence des huit pays cadre de notre étude.

II.3. Hypothèses testées

Pour atteindre les objectifs de cette étude, nous avons posé et vérifié trois hypothèses :

II.3.1. Hypothèse 1

La variabilité intra-balle est prévisible en fonction des conditions de production en Afrique et des équipements et conditions d'égrenage. Si la distribution obtenue des caractéristiques technologiques des fibres prélevées à l'intérieur des balles suit une loi normale, vérifier cette hypothèse se résume à décomposer la variance intra-balle.

II.3.2. Hypothèse 2

Le doublement du nombre de sabots (un sabot prélève un échantillon sur une face de la balle de coton) par balle peut être évité en remplaçant le sabot supérieur d'une balle par le sabot inférieur de la balle suivante.

II.3.3. Hypothèse 3

Les variations entre balles successives sont suffisamment lisses pour que la précision des caractéristiques technologiques de chaque balle puisse être améliorée par interpolation. En réalité nous avons affaire à une production plus ou moins homogène et qui se mélange sur le marché de coton-graine et au cours de l'égrenage ; il n'y a donc pas d'indépendance entre les mesures successives dans le flot de coton fibre qui sort de l'usine. C'est cette auto-corrélation entre mesures successives que nous voudrions vérifier et mettre à profit pour l'interpolation.

Chapitre III

Les méthodes de classement des fibres de coton

Chapitre III. Les méthodes de classement des fibres de coton

III.1. Introduction

La caractérisation de la qualité du coton fibre est indispensable pour l'industrie textile car elle permet une gestion optimale de la matière première et du processus de production en filature, en tissage et tricotage et en teinture et finition. Elle permet également de déterminer la qualité des produits textiles issus des opérations de fabrication (Sasser and Smith, 1984). Le coton a donc besoin d'être classé afin de sérier les différentes qualités en des lots homogènes pour sa commercialisation et/ou sa transformation (Amadou, 2010).

Le classement des fibres est l'opération qui permet d'attribuer une valeur qualitative à des balles de coton selon des méthodes et des critères partagés par tous les acteurs du monde cotonnier (Gourlot, Gawrysiak et al., 2006). Cette caractérisation sert à la constitution de lots de balles de qualités semblables et homogènes. Cette condition d'homogénéité de la qualité des cotons au sein de lots est rendue nécessaire par la spécialisation croissante des filateurs et par les vitesses croissantes de transformation des fibres en surfaces textiles (tissus, tricots).

Il existe deux grandes familles de classement à travers le monde : le classement manuel et visuel, et le classement instrumental.

III.2. Classement manuel et visuel

III.2.1. Définition

Selon SOSEA (SOSEA, 1990) : « Le classement manuel et visuel est l'art de reconnaître systématiquement et d'identifier similairement la qualité du coton fibre, en usant de termes et de standards reconnus, de classe et de soie. »

Le classement est réalisé par une méthode de comparaison entre les échantillons de coton fibre et des matières de référence qui servent d'étalon à l'opération de caractérisation. Ces matières de références sont désignées par l'expression « standard de qualité du coton fibre » (Amadou, 2006).

III.2.2. Ressources et équipements nécessaires des salles de classement manuel et visuel

Pour réaliser le classement manuel et visuel de la fibre de coton, il faut disposer des ressources humaines de qualité et avoir une salle correctement équipée et éclairée.

III.2.2.1. Ressources humaines

Il s'agit des personnes qui ont la charge de l'opération du classement. Elles sont appelées «Classeurs Coton» et possèdent en général une grande expérience dans la technique de classement manuel et visuel.

III.2.2.2. Salle de classement

Pour produire des résultats fiables d'appréciation de la qualité, la salle de classement manuel et visuel (Figure III-1) doit respecter des normes :

- Les murs, les plafonds et les sols doivent être de couleur neutre et de dominante grise.
- Un système de conditionnement d'air ambiant doit permettre le respect des conditions hygrométriques de température et d'humidité (21°C +/- 1 et 65% +/-2).
- Une bonne isolation pour limiter les coûts de fonctionnement.
- Les dispositifs d'éclairage dans la salle doivent permettre une meilleure perception possible de la couleur, ce qui nécessite l'utilisation des lampes spéciales (de préférence les lampes Macbeth).
- Des tables de classement doivent être de couleur noire pour y déposer les échantillons à classer. Ces tables doivent avoir des dimensions qui permettent une bonne répartition uniforme de la lumière sur tous les échantillons.
- Un dispositif de filtrage des poussières doit être installé pour assurer la sécurité de ceux qui travaillent dans la salle de classement (Gourlot, Gawrysiak et al., 2006).



**Figure III-1 : Salle de classement manuel et visuel de Boundiali en Côte d'Ivoire
(Cliché M. Aboé).**

III.2.3. Description des critères de qualité du classement manuel et visuel

III.2.3.1. Grade ou classe

Le grade ou classe encore appelé type de vente est un indice de propreté et de présentation des fibres. Il est défini par la combinaison de trois facteurs que sont la couleur, les matières étrangères et la préparation (SOSEA, 1990).

- Couleur : Elle est fonction de trois éléments, la teinte, l'éclat (brillant, normal ou mat), l'intensité ou degré de coloration. Par exemple les cotons américains sont classés en grand blanc, blanc, tâché, teinté, jaune et gris (extra-white, white, spotted, tinged, yellow, gray) (USDA, 2001).
- Matières étrangères (leaf ou other trash) : Elles comprennent des particules de feuilles desséchées, de bractées, de brindilles d'herbe, des motes (graines avortées), des fragments de coque, du sable, de la poussière. Les petits débris de feuilles sont appelés « puces » et lorsque ces particules de feuilles sont très fines, on parle de « pepper-trash ».

- Préparation : C'est l'aspect mécheux des fibres et des enroulements de fibres qui peuvent être observés. Elle provient de la présence dans le coton graine des fibres immatures, d'une récolte mécanique ou manuelle effectuée dans de mauvaises conditions surtout d'humidité, du degré de souplesse et de douceur avec lequel a été égrené le coton graine.

III.2.3.2. Longueur de la soie

Encore appelée longueur commerciale ou « *staple length* », elle est le deuxième critère de qualité du classement manuel et visuel. Elle est déterminée par une méthode dite de *pulling* qui est une estimation de la longueur des fibres à partir d'une barbe de fibres parallélisées par une opération manuelle.

III.2.3.3. Caractère du coton

Le caractère du coton n'est pas en réalité un critère commercial de qualité, mais il influence le jugement du classeur. Il s'agit de l'uniformité de la longueur, le corps et le crochet du coton.

- L'appréciation de l'uniformité de longueur résultera de la facilité avec laquelle le classeur fait son *pulling* (préparation manuelle d'une barbe de fibres parallélisées) pour déterminer la longueur de soie. Un coton, qu'il soit court ou long, permet de faire une mèche carrée lorsqu'il est uniforme ; cela favorise une meilleure appréciation de la longueur.
- Le corps est la compacité relative d'une masse de fibres. Un coton ayant du corps donne l'impression de rebondir ; il possède une bonne élasticité à la pression. Un coton "mou" ou "mort" n'a pas cette élasticité et reste comprimé.
- Le crochet est la résistance offerte au tirage par les fibres lors du *pulling*.

III.2.4. Technique de classement manuel et visuel

Le classement manuel et visuel consiste à :

- Déterminer le grade ou type de vente du coton.
- Déterminer la longueur de la soie par la méthode de *pulling*.

III.2.4.1. Opération de détermination du grade ou type de vente

Cette opération consiste à comparer des échantillons de la production avec des matières de référence appelées standards, afin de leur attribuer une qualité qui va définir leur valeur marchande.

III.2.4.1.1. Standards de qualité

Les standards des types de vente sont des matières de référence utilisées pour garantir la validité du classement. Ces échantillons de fibres créés parfois artificiellement représentent les différentes qualités de coton fibre qu'on peut obtenir dans un pays ou une région après l'égrenage du coton graine.

Les standards, élaborés et décrits par les classeurs réunis spécialement pour leur création, sont renouvelés périodiquement chaque 2 à 3 ans (Amadou, 2006) Figure III-2.



Figure III-2 : Boîtes standards des types de vente du Bénin confectionnées au renouvellement de 2010 (Cliché M. Aboé).

III.2.4.1.2. Mode opératoire et analyse des échantillons

A l'arrivée dans la salle de classement, les échantillons sont conditionnés pendant quelques heures avant que le classement proprement dit ne puisse débuter. Les échantillons sont ensuite transportés vers la zone de classement dans des pochettes. Les pochettes dans lesquelles se trouvent les échantillons sont ouvertes et les échantillons sont disposés sur les tables, rangées par ordre chronologique des numéros de balles. Ainsi ils sont prêts pour leur caractérisation (Figure III-3).

Généralement les pochettes proviennent de l'usine avec le journal de production où sont mentionnées les informations suivantes : usine, provenance et choix du coton graine, variété, type d'aspiration (camion ou silo / Module), numéro de balle, poids brut et net, et humidité du coton graine. Les résultats du classement et les éventuels défauts d'égrenage sont reportés dans ce journal de production. Une copie du journal avec ces nouvelles

informations est retournée à l'usine pour exploitation (marquage des balles, établissement des états journaliers et décadaires de production, etc.). Dans certains pays, le journal de production arrive de l'usine sous forme de support électronique (disquette, CD, courrier électronique, etc.).

Pour évaluer le grade, le classeur procède avec soin à l'inspection des échantillons disposés sur des tables de classement. Pendant cette inspection, le classeur procède à l'estimation des facteurs permettant de faire correspondre l'échantillon à un des standards de type de vente donné. Il s'agit des facteurs déterminants du grade du coton : couleur, matières étrangères et préparation que nous avons déjà décrits plus haut.

L'acquisition d'une certaine habilité pour établir rapidement et sûrement le grade qui se rapproche de l'échantillon examiné constitue l'essence même du fondement du métier du Classeur coton fibre. Pour ce faire, chaque Classeur doit prouver qu'il maîtrise parfaitement la connaissance des standards officiels.

Un même grade doit être attribué aux échantillons qui présentent les mêmes facteurs déterminants de grade. En cas de doute, d'hésitation ou de jugement différent entre deux classeurs, les standards de type de vente servent de référence. C'est pour cette raison qu'il est conseillé d'avoir au moins deux Classeurs habilités par table de classement.



Figure III-3 : Disposition des échantillons sur la table de classement (Cliché M. Aboé).

III.2.4.2. Opération de détermination de la longueur de la soie

Pour évaluer la longueur de la soie encore appelée longueur commerciale des fibres, on procède de la façon suivante :

- Une barbe de fibres parallélisées est constituée manuellement par « tirages » successifs des fibres et élimination des fibres emmêlées (Figure III-4). Cette méthode est dite de pulling.
- Le classeur évalue ensuite visuellement la longueur des fibres en comparant la longueur de cette barbe à ce qu'il obtiendrait sur des standards physiques de longueurs connues. Cette longueur est exprimée en fraction d'inch (1 inch = 32/32ème de pouce = 25,4mm). Les longueurs obtenues en AOC sont généralement comprises entre 1''1/16 et 1''5/32 (Figure III-5).
- Enfin, le classeur peut également avoir une idée sur l'uniformité de la longueur, la résistance, le taux de neps (nœuds de fibres) et l'humidité du coton en faisant le pulling.



Figure III-4 : Détermination de la soie par le Chef Classeur de la SODEFITEX/ Sénégal (Cliché I. Ka).



Figure III-5 : Illustration des longueurs de soie obtenue par la méthode du 'pulling'
(Cliché M. Aboé).

III.3. Classement Instrumental

III.3.1. Définition

Selon (USDA, 2001), on définit le classement coton fibre comme étant une application des procédures standardisées développées par l'USDA pour mesurer les propriétés physiques de la fibre qui affectent les qualités des produits finis et manufacturés. Le classement USDA consiste à déterminer la longueur de la fibre, l'uniformité de la longueur, la ténacité, le micronaire, la couleur, la préparation et la feuille. Donc ce classement n'est pas totalement instrumental.

Nous définissons le classement instrumental comme étant la mesure par appareil approprié des caractéristiques technologiques de la fibre de coton dans des conditions respectant les normes internationales en vue d'un usage commercial.

III.3.2. Equipements utilisés pour le classement Instrumental

Pour effectuer le classement instrumental, il faut disposer fondamentalement d'un laboratoire d'analyse respectant les normes requises, des dispositifs de fourniture d'énergie et des fluides, et d'un ou plusieurs instruments de mesure.

III.3.2.1. Laboratoire d'analyse

III.3.2.1.1. Système conditionnement d'air ambiant et l'isolation du laboratoire

Le laboratoire de classement instrumental est tenu de respecter les caractéristiques de la norme ASTM (*American Standard for Testing and Materials*) D1776, qui indique que la température doit être de 70°F \pm 2°F (environ 21°C \pm 1°C) et 65 % d'humidité relative \pm 2 %. On peut également choisir de respecter la norme ISO 139 qui décrit les conditions de l'air ambiant à savoir 20° \pm 2°C et 65 % \pm 4 % d'humidité relative (Gourlot, Gawrysiak et al., 2006).

Il convient de signaler qu'en général, les laboratoires en Afrique respectent la norme ASTM, mais parfois les difficultés liées à l'instabilité de l'énergie électrique viennent perturber le respect de ces normes. On en déduit la nécessité d'avoir une bonne isolation pour réduire la consommation d'énergie électrique et rendre les conditions plus stables.

III.3.2.1.2. Dispositifs de fourniture d'énergie et de fluides

La fourniture d'énergie et des fluides requis pour alimenter les instruments de mesure est assurée par des dispositifs spécifiques fiables et performants.

III.3.2.2. Instruments de caractérisation de la fibre de coton

Les instruments utilisés actuellement pour le classement instrumental sont des chaînes de mesures instrumentales (CMI). Une CMI est un instrument de mesure à grande vitesse qui a été conçu pour caractériser toutes les balles d'une production de coton avec un rythme élevé. Elle est constituée de plusieurs modules (instruments intégrés) qui permettent de déterminer (selon les constructeurs et les modèles d'équipement proposés) :

- L'indice micronaire,
- L'index de maturité,
- La longueur et l'uniformité des fibres,
- L'indice de fibres courtes,
- La ténacité et l'allongement,
- Le taux d'humidité des fibres,
- La colorimétrie,
- Le taux et la taille des matières étrangères.

La Figure III-6 représente un exemple de CMI, le modèle HVI 1000 M1000 ; il correspond à celui qui a servi à caractériser les échantillons de la présente étude.

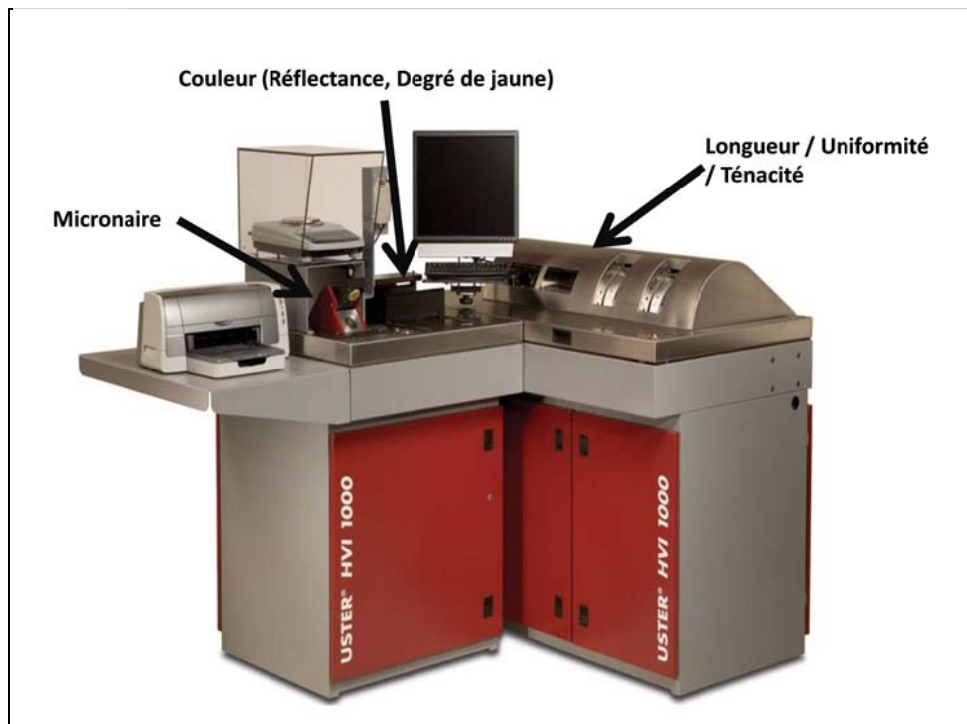


Figure III-6 : CMI, modèle HVI 1000 M1000 de Uster Technologies (Cliché du recueil publicitaire).

III.3.3. Caractéristiques technologiques des fibres de coton et principes de mesure

Le présent paragraphe présente un aperçu des paramètres technologiques de la fibre de coton et les principes pour les mesurer (seuls ceux recommandés par le CSITC).

III.3.3.1.1. Micronaire

Le micronaire est décrit comme une mesure du complexe maturité/finesse qui conjugue la maturité (liée à l'épaississement de la paroi secondaire des fibres) et la finesse qui est la masse linéique des fibres (Lord and Heap, 1988).

Il s'agit de mesurer la porosité à l'air (Figure III-7) d'un échantillon de fibres d'une masse définie. Ce degré de porosité mis en relation avec la masse linéique des fibres exprimée en micro-gramme par pouce de longueur (Lord, 1955; Lord, 1956; Lord, 1956; Lord, 1956) a été appelé micronaire. Renommé indice micronaire, il s'exprime sans unité à la suite d'un effort de normalisation (Krowicki and Duckett, 1996).

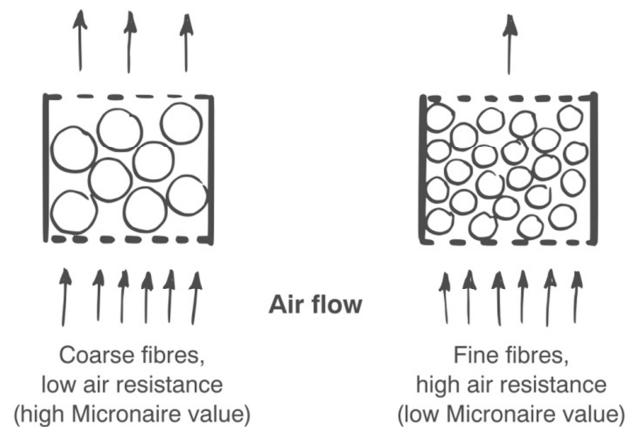


Figure III-7 : Principe de mesure du micronaire.

La mesure est faite sur un échantillon de fibres de masse donnée, placé dans une chambre de volume connu dans laquelle circule un courant d'air de débit et de pression fixes. La pression résiduelle de l'air qui traverse le tampon de fibres est proportionnelle à la surface extérieure moyenne des fibres dans la chambre (une définition particulière de la surface spécifique donnée par Lord).

III.3.3.1.2. La longueur et l'uniformité de la longueur

Plusieurs méthodes ont été créées pour déterminer la longueur des fibres de coton avec une bonne précision. Cependant la méthode de référence est celle où la longueur de chaque fibre est mesurée individuellement et permet la constitution d'un histogramme (Figure III-9) duquel sont déduites la moyenne, le coefficient de variation, etc.

Pour la majorité des autres méthodes, il s'agit de répartir les différentes classes de longueur de fibres isolées par une préparation sur des champs de peignes parallèles et d'en quantifier les importances relatives par des comptages ou par des pesées pour chaque classe. Dans ces méthodes, la préparation des fibres permet de supposer avec confiance que les origines de chaque fibre sont alignées et peuvent constituer un diagramme des fréquences cumulées (Figure III-10, intégrale de l'histogramme des fréquences). Des méthodes particulières (Roerich, 1947) permettent de déduire les informations importantes de ce diagramme. Ces méthodes sont relativement longues et ne sont accessibles qu'à des opérateurs possédant une grande pratique.

Il a ensuite été montré qu'un échantillonnage randomisé par un peigne de fibres avec un échantillonneur tel que le Fibrosampler (les fibres sont prélevées par un peigne au travers d'une plaque perforée) permet d'obtenir des résultats comparables aux méthodes traditionnelles, avec l'avantage d'être réalisé en quelques secondes seulement (Hertel, 1940; Hertel and Lawson, 1964). Cette méthode d'échantillonnage, qui prélève des fibres au

hasard dans un échantillon de fibre et où chaque fibre est maintenue par le peigne à un endroit sélectionné au hasard de leur longueur (Figure III-8), est à la base du 'fibrogramme' (Figure III-11) à partir duquel sont extraits les paramètres de longueur utiles.

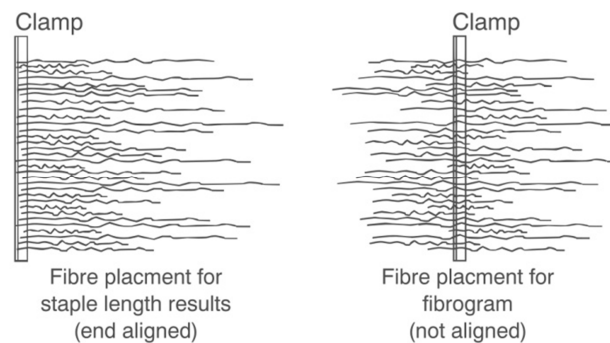
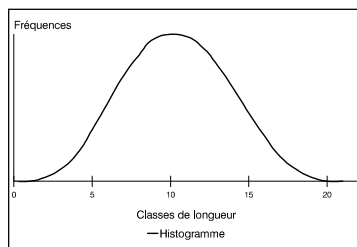
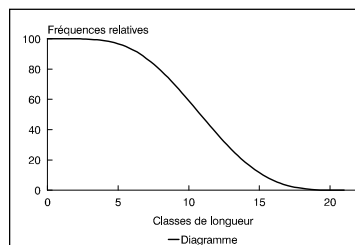


Figure III-8 : Principe d'échantillonnage des fibres pour la caractérisation de leur longueur.

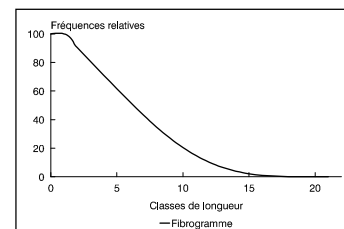
Ainsi, à partir de ce fibrogramme, il existe deux modes d'interprétation *Span Length*, longueur d'extension ou d'étirement, et *Mean Length* permettant de raccorder ces résultats à ceux des méthodes antérieures. Nous ne décrivons ici que ce dernier mode d'interprétation.



**Figure III-9 :
Représentation de la
distribution de la
longueur des fibres
sous la forme d'un
histogramme.**



**Figure III-10 :
Représentation de la
distribution de la
longueur des fibres
sous la forme d'un
diagramme.**



**Figure III-11 :
Représentation de la
distribution de la
longueur des fibres
sous la forme d'un
fibrogramme normalisé.**

Le mode d'interprétation *Mean length* est graphiquement équivalent à un tracé de tangentes au fibrogramme à des points caractéristiques (Figure III-12) du fait des propriétés particulières des fonctions d'auto-corrélation. Pour simplifier la mise en évidence des critères retenus habituellement, deux tracés sont nécessaires :

- la Mean Length (ML) est égale à la longueur moyenne de toutes les fibres constituant le faisceau de fibres (Équation III-1).

$$\text{Mean length} = \frac{\sum_{n_i\%=0}^{100} n_i \% \cdot l_i}{\sum_{n_i\%=0}^{100} n_i \%}$$

Équation III-1

avec $n_i \%$ = pourcentage de fibres ; et l_i : longueur correspondante.

Une tangente au fibrogramme tracée à partir du point 100 % de fibres (à l'endroit de la première lecture d'*amount* ou *Base amount* ou quantité de fibres dans le peigne estimée par le capteur optique de la CMI) indique la *Mean Length* sur l'axe des longueurs (Figure III-12).

- La valeur Upper Half Mean Length (UHML) est la longueur moyenne des 50 % des fibres qui apparaissent les plus longues dans le faisceau (Équation III-2).

$$\text{Upper Half Mean Length} = \frac{\sum_{n_i\%=0}^{50} n_i \% \cdot l_i}{\sum_{n_i\%=0}^{50} n_i \%}$$

Équation III-2

Avec $n_i \%$ = pourcentage de fibres ; et l_i = longueur correspondante.

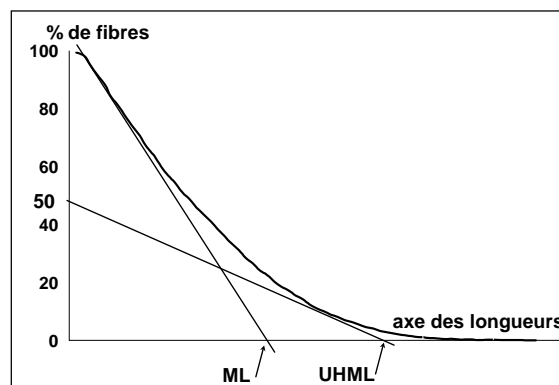


Figure III-12 : Système d'interprétation du fibrogramme ; principe des Mean Lengths.

La tangente au fibrogramme tracée à partir du point 50 % de fibres indique la longueur UHML sur l'axe des longueurs. Les résultats pour cette caractéristique sont équivalents aux estimations de la longueur "*pulling*" (longueur obtenue par un classeur manuel avec un pas de 1/32^{ème} de pouce) (Baker, Hughs et al., 2010; Bargerion, 1996; Bargerion and Sasser, 1993).

Les standards UHVICC (*Universal High Volume Instrument Calibration Cottons*) donnent les longueurs selon cette interprétation *Mean Length* du fibrogramme.

Un ratio d'uniformité est déduit du système d'interprétation du fibrogramme : l'*Uniformity Index* (UI %) selon la formule de calcul : $UI\% = \frac{ML}{UHML} * 100$

III.3.3.1.3. La ténacité et principe de mesure

Avant d'aborder les principes de mesure, voyons la définition de la ténacité, notion propre au domaine de la science des fibres et différente de la grandeur 'ténacité' utilisée en mécanique des matériaux.

La ténacité dans le domaine textile, exprimée en cN/tex, peut être reliée par le biais de la masse volumique à la notion de contrainte en traction généralement utilisée pour les matériaux (Gourlot, 2002) (Équation III-3).

$$\text{Ténacité (cN / tex)} = \text{Contrainte (Pa)} \times \frac{10^{-4}}{\text{Masse volumique (kg / m}^3\text{)}}$$

Équation III-3

La contrainte correspond à la charge de rupture par unité de surface rompue (généralement exprimée en Pascal ou le cas échéant en daN/cm²). Comme il n'est pas possible de mesurer la surface rompue pour les textiles, on utilise la masse linéique (g/1000 m) qui en est une estimation correcte quand la masse volumique du matériau est constante et connue (il est admis que celle de la cellulose est de 1520 kg/m³ (Morton and Hearle, 1975)).

Pour la mesure de la ténacité dans une CMI, un sous-échantillon des fibres maintenues dans le peigne d'échantillonnage est serré dans des pinces initialement écartées de 1/8^{ème} de pouce pour permettre son allongement et sa mesure (Figure III-13). La force est enregistrée grâce à une jauge de déformation et la masse est estimée grâce au micronaire.

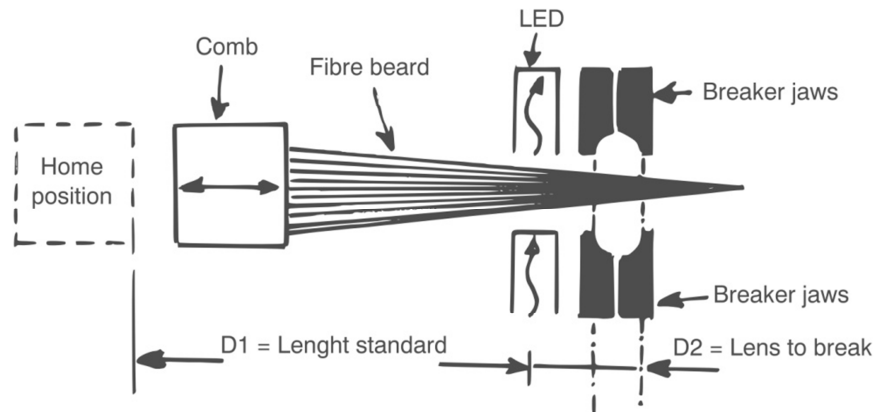


Figure III-13 : Principe de mesure de la ténacité.

III.3.3.1.4. La Colorimétrie (Rd et +b)

L'échantillon de coton fibre est plaqué contre une vitre d'examen et reçoit un éclairage sous un angle donné au moyen de deux lampes ou de flash (Xénon-*flash* : c'est une nouvelle lumière qui limite les variations d'intensité de lumière et d'étalonnage dans le temps pour les mesures de colorimétrie). La lumière réfléchiée par l'échantillon est filtrée au moyen de deux filtres de caractéristiques spectrales précises. L'énergie lumineuse transmise après filtrage est mesurée au moyen d'une cellule photoélectrique. Cette énergie est convertie en deux paramètres colorimétriques selon la méthode de Nickerson/Hunter (Réflectance Rd % et le degré de jaune +b noté X.b dans ce document) :

- La réflectance Rd : Cette valeur caractérise la proportion de lumière réfléchiée par les fibres de cotons. Elle correspond à la réflectance (Rd%) représentée sur le graphe des couleurs de type Nickerson/Hunter (Figure III-14).
- Le degré de jaune (+b) : Cette valeur caractérise la composante jaunâtre de la lumière réfléchiée par les fibres de cotons. Elle correspond au degré de jaune (+b) représenté dans le graphe des couleurs Nickerson/Hunter (Figure III-14).

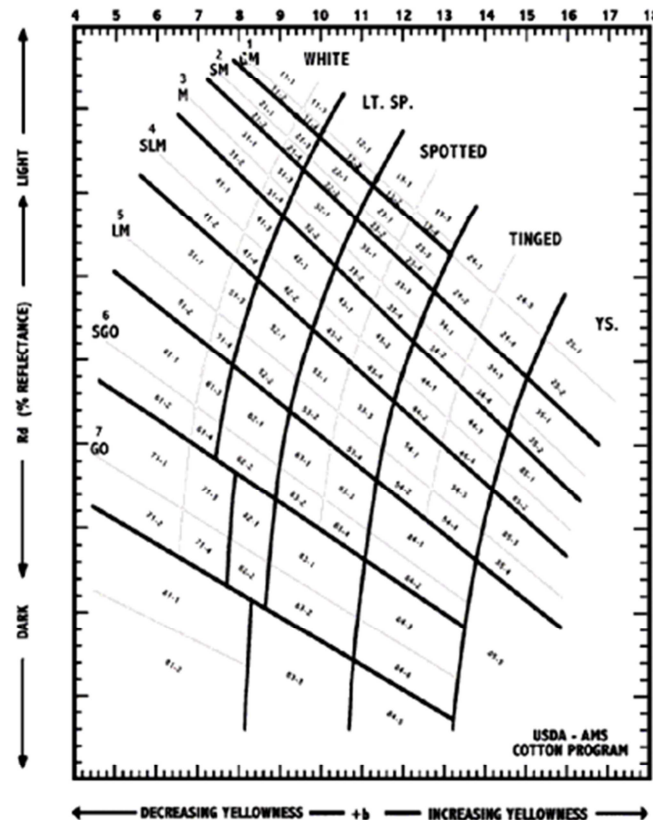


Figure III-14 : Graphe de couleur USDA.

III.3.4. Techniques du classement instrumental

III.3.4.1. Conditionnement des échantillons

Les échantillons destinés au classement instrumental doivent être conditionnés pendant 24 heures afin d'avoir une teneur en eau comprise entre 6,75 et 8,25 % (USDA, 2001) requise pour une bonne analyse.

III.3.4.2. Mode opératoire du classement instrumental

Après s'être assuré du conditionnement d'air dans le laboratoire, du bon fonctionnement des instruments de mesure, et de la durée de conditionnement des échantillons à analyser, les analyses peuvent débuter. Il faut se référer aux notices des appareils de mesure pour savoir s'ils imposent un ordre d'utilisation des différents modules pour l'analyse des échantillons.

Sur chacun des modules de la chaîne, il faut choisir le nombre de mesures à réaliser par échantillon pour le caractériser pleinement avant de commencer le test (des études de

variabilité des caractéristiques technologiques sont nécessaires pour choisir ces nombres de mesure par échantillon afin d'éviter les risques de réclamation. Ce point sera développé dans le Chapitre IV).

Généralement, on commence par saisir les références de l'échantillon à analyser (sur un clavier ou par lecteur de code barre) avant de séparer l'échantillon en plusieurs spécimens représentatifs :

- un premier spécimen est caractérisé pour le micronaire,
- un deuxième spécimen est caractérisé pour la colorimétrie,
- un troisième spécimen est caractérisé pour les autres paramètres (UHML, UI%, Str etc..).

Ces trois opérations d'analyse se réalisent en temps masqué et rapidement. Pendant le temps de ces analyses, l'opérateur peut alors préparer l'échantillon suivant selon le même ordre que le précédent échantillon, et cela pour tous les échantillons de la série à tester.

Les deux premières caractéristiques (le micronaire et la colorimétrie couplée avec l'analyse du taux de déchets) peuvent être interverties. En revanche, ces mesures doivent toujours précéder la mesure des longueurs et de la ténacité car les informations sur le micronaire servent à calculer la ténacité.

Pour que les instruments de mesure puissent donner de bons résultats, il faut régulièrement procéder à la vérification de l'étalonnage de ces modules en vue de les ajuster si nécessaire.

III.3.4.3. Etalonnage / ajustage de l'instrument de mesure

Avant d'utiliser la CMI, il faut s'assurer que chacun de ses modules est capable de produire des résultats fiables. Pour cela, il faut se procurer des standards ou des matières de référence dont les caractéristiques sont connues et les analyser sur les modules de la CMI :

- Pour le micronaire, il faut utiliser des International Calibration Cotton Standards (Micronaire Only) ou des Standard Universels pour le Micronaire, dont un standard est de bas micronaire compris entre 2,5 et 4,0 et un standard est de haut micronaire compris entre 4,0 et 5,6 (USDA, 2001).
- Pour la colorimétrie, on utilise les plaques en céramique dont les valeurs de références sont validées par l'USDA (même quand elles sont fournies par le constructeur).
- Pour la longueur et la ténacité, on utilise deux « HVI Universal Calibration Standards » : un « short / weak » (fibre courte avec une faible ténacité) et un « long / strong » (fibre longue avec une ténacité élevée). Ces deux cotons sont choisis pour correspondre à des caractéristiques spécifiques (Tableau III-I).

Tableau III-I : Caractéristiques typiques des matières de référence pour la longueur et la ténacité (USDA, 2001).

For testing Upland cottons	HVI UHM Length (In.)	M/UHM Uniformity (Pct.)	HVI 1/8" Strength (g/Tex)	Micronaire (Rdg.)
Short Staple	Below 1.00	77 – 81	22 – 25	3.6 – 4.4
Long Staple	1.13 – 1.20	83 – 90	30 – 34	3.6 – 4.4

For testing ELS cottons	HVI UHM Length (In.)	M/UHM Uniformity (Pct.)	HVI 1/8" Strength (g/Tex)	Micronaire (Rdg.)
Short Staple	1.10 – 1.20	82 – 90	30 – 34	3.6 – 4.4
Long Staple	1.30 +	84 – 90	37+	3.6 – 4.4

Dans un premier temps, on procède à ce qu'on appelle en anglais le « *calibration check* » c'est-à-dire à la vérification de l'étalonnage en comparant les résultats obtenus par chacun des modules de la CMI à ceux qui leur sont assignés au niveau international. Si la comparaison confirme que les résultats d'analyse sont inclus dans la tolérance technique autour de la valeur théorique de chacune des matières de référence, alors il n'est pas nécessaire d'ajuster la CMI. et on peut procéder aux tests sur échantillons. En revanche, si cette comparaison confirme que les résultats d'analyse ne sont pas comparables à ceux attendus, c'est-à-dire que les résultats obtenus sont en dehors de la tolérance technique attendue autour de la valeur théorique de chacune des matières de référence, alors il est nécessaire d'ajuster les modules concernés grâce à la procédure de l'étalonnage ou « *calibration* ».

Si la procédure de *calibration* doit se faire plusieurs fois de suite, il faut envisager un problème technique important sur l'instrument de mesure et/ou les matières de référence et/ou les conditions environnantes et déclencher une maintenance spécifique (Gourlot, Gawrysiak et al., 2006).

III.3.4.4. Nécessité d'une standardisation et d'une harmonisation des tests

Supposons que deux échantillons identiques soient prélevés sur une même balle de coton et que ces deux échantillons soient envoyés dans deux laboratoires différents (par exemple celui du service classement et celui du client filateur) pour y être analysés. Il peut arriver que les résultats des mesures des caractéristiques technologiques des fibres obtenus ne concordent pas avec les tolérances commerciales ou entre les deux laboratoires. Dans ce cas, il est difficile, voire impossible, de savoir quels sont les résultats valides.

Pour éviter ce problème, il faut dans un premier temps standardiser les pratiques au sein des laboratoires de classement. La standardisation est nécessaire pour parler une même langue comprise par tous. A cet effet, le groupe de travail CSITC a établi des recommandations que doivent suivre les laboratoires :

- Méthodes et procédures standard de test fixées,
- Matériel et matériaux d'étalonnage fixés,
- Pas de restriction à un fabricant d'appareils,
- 6 paramètres suffisamment fiables avec leur définition et leur mode d'étalonnage fixés (Micronaire, Strength, Length, Length Uniformity, Reflectance Rd, Yellowness +b) (Drieling and Gourlot, 2008).

Dans un deuxième temps, il faut harmoniser les tests afin que les résultats obtenus sur un même échantillon entre différents laboratoires du monde entier soient comparables. Les tests intra et inter-laboratoires d'harmonisation sont alors nécessaires.

III.3.4.4.1. Tests intra-laboratoire : les re-tests internes

Ils consistent à tester une première fois un lot d'échantillon sur une CMI puis à tester le même lot d'échantillons une seconde fois sur la même CMI dans le même laboratoire. La comparaison des deux jeux de résultats permet d'évaluer le niveau de répétabilité des mesures au sein du laboratoire.

Les re-tests sur des échantillons sélectionnés au hasard est conseillés chaque jour dans le cadre d'un classement instrumental (Gourlot, Gawrysiak et al., 2006).

III.3.4.4.1. Tests intra-laboratoire : les re-tests externes

Ils consistent à tester une première fois un lot d'échantillon sur une CMI dans le laboratoire d'origine et d'isoler par hasard un pourcentage de ces échantillons pour les faire tester par un autre laboratoire indépendant du premier. La comparaison des deux jeux de résultats permet d'évaluer le niveau de reproductibilité des mesures entre laboratoires d'un même organisme.

Les re-tests sur des échantillons sélectionnés au hasard sont également conseillés chaque jour dans le cadre d'un classement instrumental (Gourlot, Gawrysiak et al., 2006).

III.3.4.4.2. Tests inter-laboratoires : les round-tests internationaux

Les tests inter-laboratoires consistent à tester les « mêmes échantillons » dans différents laboratoires. Drieling (Drieling and Gourlot, 2008) indique le déroulement généralement appliqué :

- L'organisateur envoie des échantillons d'une matière homogène à tous les laboratoires participants.
- Les laboratoires testent les échantillons selon les prescriptions de l'organisateur et renvoient leurs résultats à l'organisateur.
- L'organisateur analyse et compare tous les résultats.
- Chaque laboratoire reçoit ensuite une évaluation comprenant ses résultats comparés à ceux de tous les autres participants.

Les tests inter-laboratoires sont encore appelés *round tests* : ils permettent de connaître le niveau de performance d'un laboratoire parmi un groupe de laboratoires mondiaux. Ils permettent également d'évaluer les niveaux de répétabilité et de reproductibilité des résultats des caractéristiques technologiques de la fibre de coton. Les tests internationaux périodiques pour le coton sont :

- CSITC Round Trial ;
- USDA: HVI Check-test ;
- RTC Round Trial ;
- Faserinstitut Bremen: Bremen Cotton Round Trial ;
- Autres tests (régional / non périodique / non public).

La participation aux *round tests* est fondamentale pour tous les laboratoires qui œuvrent pour la standardisation universelle (Knowlton, 2005). Tous ces tests ont leur propre importance, ils ne peuvent pas se remplacer l'un l'autre. Il est donc généralement conseillé de participer à une majorité d'entre eux, en particulier aux deux ou trois premiers de la liste ci-dessus.

III.4. Analyse critique des méthodes de classement et pré-requis nécessaires

Les industries de transformation du coton fibre, en particulier les filateurs, ont besoin d'une matière première homogène. Avec les évolutions de technologies dans l'industrie textile, les équipements sont très sensibles à l'hétérogénéité de la matière première, et les filateurs ont aussi besoin de produire des fils homogènes en qualité. Le classement du coton fibre a pour rôle de répartir les balles de coton de la production en lots homogènes en qualité pour la vente. Pour effectuer ce travail, il existe deux méthodes ; le classement manuel et visuel et le classement instrumental. Parmi ces deux formes de classements, laquelle répond mieux aux exigences des filateurs ?

Le classement manuel et visuel intègre seulement deux critères d'appréciation de la qualité dans le classement, la longueur de la fibre et le grade, qui sont déterminés manuellement et visuellement. Il fournit un nombre insuffisant de critères par rapport à ceux dont a besoin le filateur pour optimiser sa productivité et fabriquer le fil de qualité désirée. Les propriétés de la fibre dont a besoin le filateur ne sont pas toutes malheureusement connues avec le classement manuel et visuel. En outre, c'est un classement subjectif car il peut être influencé par le facteur humain.

Aujourd'hui grâce au classement instrumental, des balles de coton sont vendues sur le marché de la fibre en connaissant leurs critères technologiques suite à leur caractérisation sur CMI. Le CSITC a recommandé six caractéristiques technologiques dans le commerce du coton fibre (le micronaire, la longueur UHML, l'uniformité de la longueur, la ténacité, la réflectance et l'indice de jaune). Il est donc clair que cette méthode de classement offre plus d'opportunités que la précédente et permet aux filateurs de connaître au moins six caractéristiques des fibres avant de les acheter.

La standardisation et l'harmonisation entre les laboratoires de classement instrumental rassurent sur la fiabilité des résultats. Cependant les instruments ne peuvent pas opérer comme les classeurs qui ouvrent les échantillons pour en apprécier le grade manuellement et visuellement. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les deux types de classement se complètent dans le classement quotidien de la production cotonnière des Etats Unis d'Amérique.

III.5. Conclusion

Les deux grandes familles de classement qui existent dans le monde sont décrites dans ce chapitre. Nous avons abordé respectivement les équipements et les installations nécessaires à chaque famille de classement, leurs spécificités respectives dans les techniques appliquées et une analyse critique des deux méthodes de classement. Nous observons que les équipements et installations périphériques dans les laboratoires sont pratiquement les mêmes. En revanche, les techniques de caractérisation sont complètement différentes car le classement manuel et visuel est réalisé par des experts classeurs pour apprécier la qualité, alors que le classement instrumental se fait avec des instruments de mesure automatisés très rapides.

Le classement instrumental n'est toujours pas pratiqué dans les pays producteurs de coton de l'AOC pour vendre la fibre, alors qu'environ 50% des balles produites dans le monde sont

classées et vendues assorties des critères technologiques des fibres. Les Africains de l'Ouest et du Centre ont donc intérêt à compléter maintenant le classement manuel et visuel par le classement instrumental pour mieux valoriser leur production en satisfaisant mieux leurs clientèles en demande de caractérisation fine des matières premières échangées. Avant d'utiliser pleinement les instruments, il faut cependant s'assurer de la fiabilité des résultats que vont produire leurs laboratoires. L'Afrique de l'Ouest et du Centre peut avoir à disposer de sa propre méthodologie adaptée à ses conditions, car si elle utilise la méthodologie appliquée ailleurs, elle peut être confrontée à des réclamations. La nécessité d'étudier la variabilité au sein des balles produites en AOC permettant de mettre en évidence un protocole opératoire d'échantillonnage et d'analyse des échantillons est donc indispensable pour assurer la fiabilité des mesures et la confiance des acheteurs de fibre. C'est l'objet du prochain chapitre.

Chapitre IV

Estimation de la variance intra-balle et détermination des modalités d'échantillonnage et de mesure sur CMI

Chapitre IV. Estimation de la variance intra-balle et détermination des modalités d'échantillonnage et de mesure sur CMI

IV.1. Introduction

La variabilité des caractéristiques technologiques de la fibre de coton mesurée sur Chaîne de Mesure Instrumentale (CMI) peut être différente d'une usine à une autre à cause des équipements installés d'une part et à cause des conditions d'usinage ou du système de culture qui prévaut dans le bassin d'approvisionnement de ces usines d'autre part. Ce phénomène peut s'observer dans les pays en développement, notamment dans les pays producteurs de coton de l'Afrique de l'Ouest et du Centre (AOC) tels que le Bénin, le Burkina Faso, le Cameroun, la Côte d'Ivoire, le Mali, le Sénégal, le Tchad et le Togo. Notons que les pays producteurs de coton de l'AOC sont les premiers exportateurs de coton en Afrique (Perret, 2009).

En effet, les exploitations cotonnières sont généralement de petite taille, familiales, cultivées manuellement avec une moyenne estimée à 0.5 ha (Perret, 2009) et de rendement assez faible. La conséquence est que les fibres qui se trouvent dans une balle de coton peuvent provenir de plusieurs exploitants (une seule variété) qui peuvent avoir travaillé dans des conditions très variables. Alors prendre un échantillon sur une couche de cette balle pour l'analyser sur CMI et attribuer la qualité trouvée à l'ensemble de la balle peut ne pas refléter la réalité de la qualité de la balle dans son ensemble. C'est pourquoi nous avons décidé d'étudier la variabilité des résultats issus des CMI dans les conditions de production africaines.

La variabilité est affectée à quatre niveaux et s'observe en particulier sur les caractéristiques technologiques des fibres contenues dans les balles de coton : 1) à l'échelle de la plante de coton où les fibres des différentes capsules des plants de cotonnier sont différentes (Levrat, 2010) ; 2) à l'échelle de la parcelle où les conditions de culture peuvent différer (impacts agronomiques, écologiques, de la variété, des pratiques culturales, du mode de récolte) (Davidonis, Johnson et al., 2000; Davidonis, Johnson et al., 2004) ; 3) à l'échelle du bassin d'approvisionnement des usines d'égrenage (cf. I.2.3.3) (Clouvel, Bachelier et al., 2003) ; et 4) à l'échelle des usines d'égrenage et de leurs équipements (qui recouvre la gestion de

l'alimentation de l'usine, le matériel installé et son utilisation) où les différents réglages affectent la qualité en la rendant plus variable (Meyer and Meyer, 1970).

Parmi ces quatre niveaux, nous nous sommes intéressés aux niveaux 3 « bassin d'approvisionnement » et 4 « équipement d'égrenage » comme sources de variabilité prépondérantes à prendre en compte dans notre étude pour répondre aux deux questions suivantes : 1) Quel est le niveau de variabilité des caractéristiques technologiques mesurées par CMI au sein des balles de coton provenant de l'Afrique de l'Ouest et du Centre ? 2) Quelles sont les modalités d'échantillonnage de balles et de réalisation des tests CMI les plus adaptées aux conditions africaines, afin de respecter les conditions de répétabilité attendues internationalement ?

Pour répondre à ces questions, nous avons conduit une expérimentation d'échantillonnage et de mesures CMI au sein des balles produites dans huit pays de l'Afrique de l'Ouest et du Centre.

IV.2. Matériels et méthodes

IV.2.1. Dispositif expérimental

IV.2.1.1. Choix des situations

Pour assurer une mesure objective de la variabilité intra-balle, notre expérimentation a été conduite sur deux saisons de production 2008-2009 (saison 1) et 2009-2010 (saison 2).

Compte tenu du nombre élevé d'usines d'égrenage dans les huit pays de l'AOC, nous avons dû faire un choix. Dans chaque pays, nous avons établi la liste des usines d'égrenage et de leur bassin d'approvisionnement en coton-graine, chacune d'elle appelée « situation », et nous avons enregistré leur liste d'équipements en nous attachant particulièrement au fait qu'elle dispose ou non de *lint-cleaners*. Dans les sous-ensembles définis par ce dernier critère, nous avons sélectionné au hasard deux ou trois usines représentatives par pays. Parmi les usines échantillonnées pendant la saison 1, nous avons pris le soin de reconduire une d'entre elles pour la saison 2.

Pour l'ensemble des huit pays, nous avons sélectionné douze situations pendant la saison 1 et dix neuf situations pendant la saison 2. Certaines situations sont communes aux deux saisons afin de répéter la mesure dans certains lieux d'une part, et d'étendre l'échantillonnage des situations dans les pays d'autre part. Pour des raisons évidentes de confidentialité, les pays et les usines retenus ont été codées (Tableau IV-I).

Tableau IV-I : Codage des facteurs de variation utilisés : 8 pays de l'AOC et 2 ou 3 situations par pays.

Pays	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Situations	G1	G2	G3	G4				

Exemple de situation : C5G4 = pays C5 usine G4

IV.2.1.2. Mode de prélèvement des échantillons

Pour mettre en place notre procédure d'échantillonnage, nous avons supposé que les camions ou les modules de coton-graine qui alimentent les usines d'égrenage proviennent de différents villages, de différents marchés d'achat de coton graine et donc que les balles qui sont issues de ces cotons-graines provenant de différents camions ou modules pourraient avoir de différents niveaux de variabilité.

Un camion ou un module de 10 tonnes de coton-graine peut produire environ 18 balles de 225kg de fibres avec un rendement à l'égrenage compris entre 40 à 42%. Ainsi, nous avons décidé de prélever une balle sur une série de vingt balles pour être sûr de prendre des fibres issues des cotons-graines provenant de différents villages ou marchés, l'objectif étant d'atteindre un grand nombre d'aires de production.

Dans le but d'étudier la variabilité intra-balle des caractéristiques technologiques de la fibre sur chaque balle échantillonnée, nous avons prélevé 8 échantillons sur 8 couches à l'intérieur de la balle (1 échantillon par couche, Figure IV-1). Pour chaque usine, 10 balles ont été prélevées en saison 1 et 5 balles en saison 2 (pour des raisons d'ordre techniques et financières). Au total 960 échantillons sont prélevés sur 120 balles et testés au cours de la première saison et 760 échantillons sur 90 balles en saison 2 (Tableau IV-II).



Figure IV-1 : Exemple de balle de coton et indication des 8 couches prélevées

(Cliché Gourlot J.-P.).

Tableau IV-II : Nombre de balles par situation.

Situations	Saison 1 Nb balles	Saison 2 Nb balles
C1G1	10	5
C1G2	10	
C1G3		5
C2G1	10	5
C2G2	10	
C2G3	10	
C2G4		5
C3G1	10	
C3G2	10	5
C3G3	10	
C3G4		5
C4G1	10	
C4G2		5
C4G3		5
C5G1	10	
C5G2	10	
C5G3	10	5
C5G4		5
C6G1		5

Situations	Saison 1 Nb balles	Saison 2 Nb balles
C6G2		5
C6G3		5
C7G1		5
C7G2		5
C7G3		5
C8G1		5
C8G2		5
C8G3		5
Total nombre de balles	120	95
Total nombre de situations	12	19

NB: Tous les échantillons ont été prélevés au cours d'une journée de production dans chaque usine ; l'opération est la même pendant les deux saisons. Notons qu'au cours de la saison 1, les usines ont été échantillonnées en fin de campagne d'égrenage dans des balles issues de cotons graines potentiellement mélangés dans des magasins ou des reliquats en provenance des marchés. La période d'échantillonnage en saison 1 n'a pas permis d'échantillonner toutes les situations envisagées. En revanche, l'échantillonnage s'est déroulé en pleine campagne d'égrenage en saison 2.

IV.2.1.3. L'analyse des échantillons sur CMI

Il s'agit de mesurer les six caractéristiques technologiques des fibres de coton recommandés par le CSITC-ICAC (ICAC-CSITC, 2010) : le Micronaire (Mic, micronaire, sans unité) ; la longueur *Upper Half Mean Length* (UHML, mm) ; l'uniformité de longueur *Uniformity Index* (UI, %) ; la ténacité (Str, g/tex = 0.981 cN/tex) ; la Réflectance (Rd, %) et l'indice de jaune (+b, *yellowness unit*).

Une balle étant l'empilement de couches successives issues d'un processus continu de production de fibre de coton, nous avons émis l'hypothèse que la variabilité intra-balle résulte de la différence entre les couches, et de l'erreur d'échantillonnage et de mesure de ces couches sur CMI. Pour estimer l'une et l'autre, nous avons divisé la balle en huit couches et avons prélevé un échantillon de fibres dans chacune des huit couches régulièrement espacées, et réalisé deux répétitions de mesures sur chaque échantillon de fibres. Les conditions de mesure sont les suivantes.

Les échantillons ont été caractérisés dans un laboratoire contrôlé, dans des conditions d'environnement standardisées, soit 65% +/- 2% d'humidité relative et 21°C +/- 1°C en température, et sur une chaîne de mesure intégrée (CMI), modèle Uster Technologies

HVI1000. Chaque répétition de mesure, donnant lieu à une ligne de résultats, s'est effectuée suivant la norme ASTM 5867 (ASTM, 2005) à savoir avec une mesure du micronaire, deux mesures de longueur/ténacité et deux mesures de colorimétrie (réflectance et indice de jaune).

Nous avons pris les précautions nécessaires pour éviter toute contamination ou, le cas échéant, en mesurer l'importance.

Au démarrage des tests le premier jour, la CMI est proprement étalonnée alors qu'une vérification et éventuellement un ajustage des instruments sont effectués les autres jours de tests. Ce sont les standards universels qui sont utilisés pour la calibration de la CMI : *the Universal Micronaire Calibration Cottons*, pour le micronaire, le *Universal High Volume Instrument Calibration Cotton Standards* pour la longueur et la ténacité et les *color tiles* pour la colorimétrie.

Après l'analyse en début de journée des deux standards, on obtient une droite d'étalonnage, si cette droite est jugée trop éloignée de la première bissectrice (Figure IV-2), on procède alors à un ajustage de la machine.

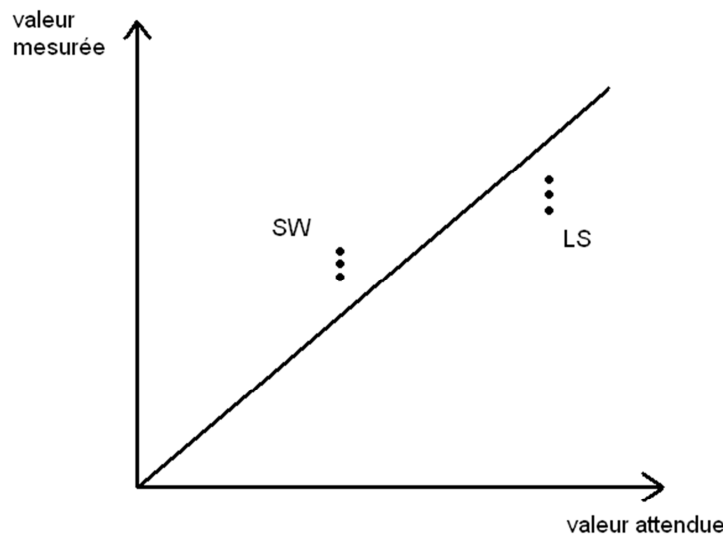


Figure IV-2 : Comparaison des valeurs mesurées sur les 2 étalons avec les valeurs attendues.

Ce n'est qu'après cette vérification que nous procédons à l'analyse des échantillons prélevés. Il faut cependant signaler que l'étalonnage en début de journée ne protège pas contre les fluctuations de température et d'humidité au cours de la journée, fluctuations

auxquelles les mesures sont sensibles. La présente étude ne concerne pas cet aspect mais nous avons inséré des matières de référence au sein des séries d'échantillons pendant la journée de tests.

L'ordre d'analyse des échantillons collectés sur la CMI a été totalement randomisé, afin de limiter des dérives possibles dues au temps. Chaque échantillon est caractérisé deux fois et les huit échantillons d'une même balle sont randomisés en bloc indépendamment des autres balles et mesurés dans un ordre aléatoire de répétition. A la fin des deux répétitions des 8 échantillons d'une même balle (16 échantillons testés), nous testons un couple de standards ou matières de référence, un *short weak* (SW) et un *long strong* (LS) dans les mêmes conditions d'analyses. Un total de 482 échantillons de matières de référence ont été testés (Tableau IV-III). La Figure IV-3 donne un exemple de résultats issus du CMI.

RTC - West / Central Africa						
System Test - Individual Tests						
Lot ID						
Print Date			HVI SW	3.1.3.18		
Print Time			Serial	0810110		
			Test Mode	4		
Bale ID	Mic	UHML	SFI	Str	Rd	+b
		[mm]	12.7mm	g/tex		
SW-1	4.45	25.00	14.8	24.6	80.9	9.9
LS-1	4.37	29.93	8.1	33.5	76.9	12.4
A-1-1	4.37	28.14	8.7	31.9	76.0	9.8
A-1-2	4.29	28.42	8.6	32.4	76.0	9.7
A-2-1	4.32	27.94	9.0	32.3	75.4	9.9
A-2-2	4.28	28.15	8.3	31.3	75.6	9.8
A-3-1	4.38	28.28	8.8	31.4	76.2	10.1
A-3-2	4.34	28.12	8.0	31.6	76.3	9.8
A-4-1	4.45	28.47	7.8	31.9	74.4	10.1
A-4-2	4.31	28.39	7.7	30.8	75.3	9.6
A-5-1	4.27	28.51	8.2	30.0	74.3	10.4
A-5-2	4.32	28.39	8.6	31.5	74.7	10.0
A-6-1	4.24	28.25	8.2	31.6	75.0	10.2
A-6-2	4.23	28.73	7.7	31.9	75.4	10.3
A-7-1	4.40	28.56	8.1	31.9	75.7	10.0
A-7-2	4.37	27.88	8.3	31.3	75.3	9.9
A-8-1	4.46	28.37	7.9	30.6	74.9	10.2
A-8-2	4.45	27.91	8.8	30.5	75.8	10.0
SW-2	4.37	24.45	15.8	23.3	80.4	9.4
LS-2	4.46	30.19	7.7	34.4	76.6	12.3

Figure IV-3 : Extrait d'une fiche de résultats CMI.

Remarque : Pour des questions de confidentialité, nous avons codé l'identification des échantillons ; ainsi, les échantillons prélevés dans les balles portaient un nom codés selon l'exemple suivant : A-8-1 correspond à l'échantillon :

- A : balle A, en fait 1ère balle échantillonnée le jour du prélèvement ;
- 8 : 8ème couche prélevée dans la balle A ;
- 1 : répétition 1 de mesure.

Les matières de référence portaient systématiquement le nom SW et LS (la clé incluant le code pays et le code usine est masqué ici pour des raisons de confidentialité).

Le Tableau IV-III résume les nombres d'échantillons prélevés et testés par situation et par saison d'expérimentation.

Tableau IV-III : Nombres d'échantillons testés par situation, par saison et par répétition pour les standards et les balles échantillonnées.

	2009				Total 2009	2010				Total 2010	Total général
	Standards		Echantillons			Standards		Echantillons			
	LS	SW	Rep 1	Rep 2		LS	SW	Rep 1	Rep 2		
C1G1	11	11	80	80	182	6	6	40	40	92	274
C1G2	11	11	80	80	182						182
C1G3						6	6	40	40	92	92
C2G1	11	11	80	80	182	6	6	40	40	92	274
C2G2	11	11	80	80	182						182
C2G3	11	11	80	80	182						182
C2G4						6	6	40	40	92	92
C3G1	6	6	80	80	172						172
C3G2	11	11	80	80	182	6	6	40	40	92	274
C3G3	11	11	80	80	182						182
C3G4						6	6	40	40	92	92
C4G1	11	11	80	80	182						182
C4G2						6	6	40	40	92	92
C4G3						6	6	40	40	92	92
C5G1	11	11	80	80	182						182
C5G2	11	11	79	79	180						180
C5G3	11	11	80	80	182	6	6	40	40	92	274
C5G4						6	6	40	40	92	92
C6G1						6	6	40	40	92	92
C6G2						6	6	40	40	92	92
C6G3						6	6	40	40	92	92
C7G1						6	6	40	40	92	92
C7G2						6	6	40	40	92	92
C7G3						6	6	40	40	92	92
C8G1						6	6	40	40	92	92
C8G2						6	6	40	40	92	92
C8G3						6	6	40	40	92	92
Total général	127	127	959	959	2172	114	114	760	760	1748	3920

Remarque 1 : En année 2009, 1 échantillon n'a pas été retrouvé ni testé.

Remarque 2 : Six répétitions seulement de matières de référence ont été analysées dans la situation C3G1 en année 1 faute de disponibilité de matière de référence.

Tous les résultats provenant des tests sur CMI sont regroupés ensemble dans une base de données et sont analysés par deux logiciels, *R software version 2.11.1* (R_Development_Core_Team, 2005) et *SAS Institute software 9.2*.

IV.2.2. Méthodes statistiques d'analyse des données

Avant d'étudier les données obtenues des mesures des échantillons prélevés dans les bassins cotonniers de l'AOC, nous avons analysé les données issues des matières de référence (ou standards) utilisées pour contrôler la stabilité de l'instrument de mesure. En effet, sur une journée d'analyse, des matières de référence qui sont des cotons homogènes dont les caractéristiques sont connues à l'avance, sont mesurés après chaque balle terminée. Cette étude avait pour objectif de détecter et de quantifier un éventuel effet date/heure, et donc de déterminer l'utilité d'une éventuelle correction des données obtenues sur les échantillons prélevés.

IV.2.2.1. Méthodes statistiques d'étude des matières de référence (standards)

Il y a deux standards dans la gamme UHVICC :

- LS (Long-Strong) : fibre longue avec une ténacité élevée ;
- SW (Short-Weak) : fibre courte avec une faible ténacité.

Pendant les deux saisons d'expérimentation, nous avons utilisé deux générations de standards. Elles ont été étudiées de manière séparée. Le Tableau IV-IV regroupe les valeurs attendues pour ces standards.

Tableau IV-IV: Valeurs conventionnelles des standards utilisés.

	Mic	UHML (mm)	UI (%)	Str (g.tex ⁻¹)	Rd (%)	X.b
LS1	4.16	30.23	83.9	32.3	78.217	12.27
LS2	3.92	31.24	85.0	36.8	79.427	11.58
SW1	4.13	24.41	80.5	23.7	75.935	13.06
SW2	4.40	25.25	79.8	25.2	77.985	9.27

Remarque : Pour les variables Rd et +b, il n'existe pas de valeur de référence reconnue ; nous avons donc retenu la moyenne générale des observations (toutes dates d'analyse, toutes usines confondues) comme valeurs de référence.

Pour détecter et vérifier l'existence d'un éventuel effet date/heure sur les mesures effectuées, l'effet de l'heure a été modélisé par un polynôme de degré 3 pour faire intervenir une éventuelle courbure au cours de la journée et non une simple droite montante ou descendante au fil des heures. Par ailleurs, on a considéré que chaque journée a un effet, un décalage qui lui est propre, et que la fonction f de l'heure est la même quelle que soit la journée considérée. L'interaction entre la date et l'effet linéaire de l'heure a toutefois été ajoutée au modèle.

On a utilisé pour cela un modèle de cette forme :

$$Y = \mu + d_i + f(\text{heure}) + d_i \times \text{heure} + \varepsilon_i \quad (\text{Equation IV-1})$$

Y : Variable réponse (Mic, UHML, UI, Str, Rd, +b)

d_i : Effet « date »

f_i : fonction lisse de l'heure : $a \times \text{heure} + b \times \text{heure}^2 + c \times \text{heure}^3$

$d_i \times \text{heure}$: Interaction date et heure

ε_i : écart supposé indépendamment et identiquement distribué (iid), et de distribution normale.

Nous avons fixé le seuil de risque $\alpha(\alpha)$ à 5 % et avons procédé à l'Anova (analyse de la variance) puis à un test de normalité des résidus.

IV.2.2.2. Méthodes statistiques utilisées pour analyser les données des échantillons prélevés

Nous avons modélisé la variance d'échantillonnage en fonction des conditions d'échantillonnage et de mesure par CMI des échantillons collectés. Ensuite, nous fixons des conditions opératoires possibles pour chaque caractéristique technologique mesurée afin de respecter un niveau de risque de litige maximum fixé de dépassement des tolérances internationales reconnues.

IV.2.2.2.1. Modèle de décomposition de la variance

Le modèle d'analyse des données acquises a été le suivant : résultat = (effet fixe balle) + (effet aléatoire couche dans la balle) + (effet aléatoire répétition ou erreur de mesure) + (interactions) (Philippeau, 1989; Saporta, 2006).

L'écriture (matricielle) du modèle est la suivante :

$$Y = X\beta + ZU + \varepsilon \quad (\text{Equation IV-2})$$

Y : Variable réponse

X : Indicatrices de Balle (IJK*I)

β : Moyennes des Balles (le modèle n'a pas de terme constant)

Z : Indicatrices des couches dans les Balles (IJK*IJ)

U : Effet des couches dans les Balles

ε : Erreur iid suivant une loi normale $N(0 ; \sigma^2)$

L'écriture indicielle de ce modèle devient :

$$Y_{i,j,k} = m_i + A_{i,j} + B_{i,k} + E_{i,j,k} \quad (\text{Equation IV-3})$$

Y : Variable réponse

m : Moyenne de la balle

A : Effet aléatoire de la couche $\sim N(0, \sigma_A^2)$

B : Effet bloc supposé négligeable

E : Effet répétition de la couche $\sim N(0, \sigma_E^2)$ indépendant de A.

i : 1...I Balles

j : 1...J Couches dans la balle

k : 1...K Répétition dans chaque couche

Les deux effets aléatoires retenus comme sources de variation (A et E) sont supposés indépendants :

- σ_A correspond à l'écart-type de l'effet aléatoire de la couche,
- σ_E correspond à l'écart-type de l'effet répétition.

Le modèle est un modèle linéaire mixte pour lequel les techniques classiques du maximum de vraisemblance restreint permettent d'estimer la variance de l'effet couche et celle de l'erreur résiduelle. A partir de l'estimation des écarts-types σ_A et σ_E , la variance de l'erreur d'estimation de la moyenne d'une balle, que nous appellerons variance d'échantillonnage σ_M^2 , peut être déduite pour tout échantillon constitué de J' couches, chacune étant mesurée K' fois :

$$\sigma_M^2 = \frac{\sigma_A^2}{J'} + \frac{\sigma_E^2}{J'K'} \quad (\text{Equation IV-4 a})$$

Si l'on décide de mélanger le coton de J' couches afin d'y faire N' répétitions en tout, la variance d'échantillonnage devient :

$$\sigma_M^2 = \frac{\sigma_A^2}{J'} + \frac{\sigma_E^2}{N'} \quad (\text{Equation IV-4 b})$$

IV.2.2.2.2. Définition du risque de litige et mode de calcul

Maintenant, nous allons nous intéresser à la différence que l'on peut observer entre deux moyennes d'une même balle calculées selon le même protocole (même nombre de couches et de répétitions), ce qui modélise pour la première moyenne la valeur trouvée par le client,

et pour la seconde celle trouvée par le fournisseur. Soit Y_1 et Y_2 ces deux moyennes qui suivent une même loi :

$$Y_1 \sim N(\mu, \sigma_M^2)$$

$$Y_2 \sim N(\mu, \sigma_M^2)$$

La loi de la différence s'écrit alors :

$$(Y_2 - Y_1) \sim N(0, 2\sigma_M^2)$$

La variance de la différence est égale à $2\sigma^2$ car les deux moyennes sont indépendantes.

On calcule ensuite la probabilité que cette différence soit inférieure à un certain seuil (ou tolérance, Tableau IV-V) qui correspond à la probabilité qu'il n'y ait pas litige commercial entre client et fournisseur de la balle de coton ; par soustraction, on obtient donc aussi la probabilité de litige. Soit Tol cette tolérance :

$$\mathbb{P}(Y_2 - Y_1) < Tol = \phi\left(\frac{Tol}{\sigma_M\sqrt{2}}\right), \text{ avec } \phi \text{ le quantile de la loi normale } N(0,1)$$

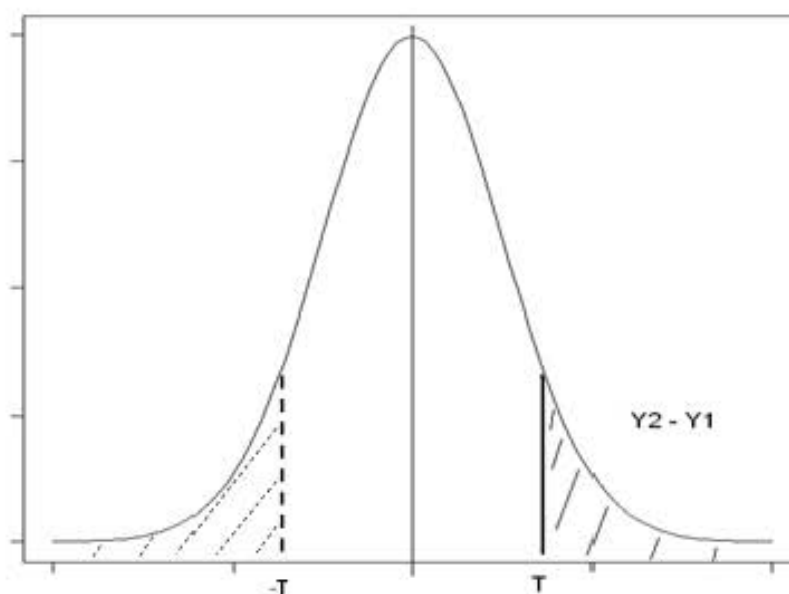


Figure IV-4: Courbe de Gauss montrant la zone de litige.

Ce calcul est unilatéral car si :

- La qualité est trop inférieure à celle annoncée (Figure IV-4 à gauche), il y a litige (zone hachurée)
- La qualité est trop supérieure à celle annoncée (Figure IV-4 à droite), il n'y a pas litige mais une perte du côté fournisseur.

On peut maintenant calculer les probabilités de litige théorique issues de cette modélisation en fonction du nombre de couches et de répétitions et ainsi déterminer le protocole qui limitera le risque de litige commercial.

Le risque de litige est défini comme la probabilité de dépassement de la tolérance commerciale par la différence delta entre la valeur trouvée par le client Y1 et celle trouvée par le fournisseur Y2. Y1 et Y2 suivent une loi normale, ainsi que la différence delta dont l'écart-type est :

$$\sigma_{\Delta} = \sigma_M \sqrt{2} \quad (\text{Equation IV-5})$$

La variance de la différence entre client et fournisseur vaut deux fois la variance d'estimation de la balle car les estimations faites par chacun d'eux sont indépendantes.

Tableau IV-V : Tolérances commerciales utilisées pour calculer le risque de litige (USDA, 2001).

Caractéristiques	Tolérances commerciales
UHML	+/- 0.508 mm
UI	+/- 1 %
Strength	+/- 1.5 cN/tex
Micronaire	+/- 0.1 unit
Rd	+/- 1 %
X.b (Yellowness)	+/- 0.5 unit

La probabilité que la différence Δ dépasse la tolérance commerciale Tol (Tableau IV-V) est :

$$P(\Delta > Tol) = P\left(\frac{\Delta}{\sigma_{\Delta}} > \frac{Tol}{\sigma_{\Delta}}\right)$$

Cette grandeur correspond à la probabilité de dépassement de la valeur $\frac{Tol}{\sigma_{\Delta}}$ par une variable aléatoire gaussienne $N(0, 1)$.

Déterminons la tolérance ayant une probabilité fixée d'être dépassée : si nous désignons cette probabilité par la valeur α , il faut que $\frac{Tol}{\sigma_{\Delta}}$ soit le quantile $1-\alpha$ de la loi gaussienne :

$$\varphi^{-1}_{(1-\alpha)} = \frac{Tol}{\sigma_{\Delta}}$$

donc:

$$Tol = \varphi^{-1}_{(1-\alpha)} \cdot \sigma_{\Delta} = \varphi^{-1}_{(1-\alpha)} \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_M \quad (\text{Equation IV-6a})$$

A l'inverse, la valeur de σ_M pour laquelle la tolérance donnée est dépassée avec un risque fixé α est :

$$\sigma_M = \frac{Tol}{\varphi^{-1}_{(1-\alpha)} \cdot \sqrt{2}} \quad (\text{Equation IV-6b})$$

Pour notre application numérique, nous avons choisi un risque de 10% de litige celui qui est pris pour les lots de balle (AFCOT, 2011), et l'écart-type de la différence vaut la tolérance commerciale divisée par le quantile (100-10)% de la loi normale $\varphi^{-1}_{(1-\alpha)} = \varphi^{-1}_{(0.90)} = 1.28$.

Pour satisfaire une tolérance donnée avec un risque de litige par balle de 10%. L'écart-type d'estimation de la moyenne de la balle vaut alors :

$$\sigma_M = \frac{Tol}{1.28 \sqrt{2}} \quad (\text{Equation IV-7})$$

A partir des valeurs estimées par σ_A^2 et σ_E^2 dans chaque situation, la variance de l'erreur d'estimation de la moyenne peut être calculée pour toute balle grâce à tout plan d'échantillonnage à l'étude. Une possibilité est de prélever J' échantillons sur des couches distinctes, puis d'analyser chacun des échantillons K' fois ; c'est la méthode de test en grappe. Dans ce cas, la variance de l'erreur d'estimation de la moyenne de la balle est donnée dans l'Equation IV-4a. Une autre possibilité est de créer un échantillon composite par assemblage de deux échantillons prélevés sur deux couches distinctes avant de l'analyser N' fois ; c'est la méthode de test d'échantillon composite. La variance de l'erreur d'estimation de la moyenne de la balle à partir de cet échantillon composite est donnée dans l'équation IV-4b.

IV.2.2.2.3. Méthodologie pour définir le mode opératoire (nombre d'échantillons et de mesures par balle par caractéristique technologique)

Il s'agit de définir ici les conditions opératoires possibles pour chaque caractéristique mesurée afin de respecter la tolérance internationale reconnue et un risque de ne pas la dépasser de 10% maximum. Nous nous sommes référés aux tolérances américaines (Tableau IV-V, (USDA, 2001) p. 11).

J' étant le nombre de couches prélevées par balle et K' le nombre de répétitions de mesures réalisée par couche, si $J'=K'=1$, la variance d'échantillonnage vaut alors simplement la somme des variances inter et intra-couche. Dans l'échelle des écarts-types, les lignes d'iso-variance d'échantillonnage se matérialisent alors par des cercles de rayon σ_M d'équation $\sigma_M = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_E^2}$. Toutes les usines situées sur le même cercle ont une variance d'échantillonnage comparable.

Nous pouvons envisager trois façons de diminuer la variance d'échantillonnage (Figure IV-5) :

- Augmenter le nombre de répétitions de mesures de l'échantillon prélevé sur une couche, alors $J'=1$ et $K'>1$: les nouvelles lignes d'iso-variance sont des ellipses de grand axe horizontal d'équation $\sigma_A^2 + \frac{\sigma_E^2}{K'} = \sigma_M^2 = \text{Constante}$. Cela est intéressant si la contribution de l'erreur de mesure domine celle de l'inter-couche.
- Augmenter le nombre de couches échantillonnées, alors $J'>1$ et $K' = 1$. Nous obtenons un cercle d'iso-variance d'équation $\sigma_A^2 + \sigma_E^2 = J' \cdot \sigma_M^2$. Cela est intéressant si les contributions des variances inter-couche et intra-couche sont équilibrées.
- Augmenter le nombre de couches échantillonnées sans augmenter le nombre de répétitions de mesures. Alors $J'>1$ et $N'=1$: Nous obtenons une ellipse d'équation $\frac{\sigma_A^2}{J'} + \sigma_E^2 = \sigma_M^2$ et de grand axe vertical.

En pratique, le nombre J' de couches doit être limité à deux, car on ne peut prélever facilement les échantillons de fibres à l'aide d'un sabot ou cutter que dans les deux couches supérieure et inférieure d'une balle.

Dans la Figure IV-5, chaque situation étudiée sera représentée par ses coordonnées SigmaA et SigmaE. En complément, nous avons tracé deux types de courbe d'iso-variance :

- Une première courbe en gras qui correspond à un échantillon et une répétition et calculée à partir de $\sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_E^2} = \sigma_M = \frac{Tol}{1.28\sqrt{2}}$.
- Un deuxième type de courbe d'iso-variance en gras pointillé obtenue en augmentant soit le nombre d'échantillons J' , soit le nombre de répétitions K' ou N' , soit les deux simultanément selon la variable étudiée pour englober le plus de situations possibles.

A l'intérieur de ces courbes limites se retrouvent les situations pour lesquelles σ_M est inférieur au seuil défini par l'équation IV-5. Dans ce cas, le risque de litige sera inférieur à 10% en prenant en compte les tolérances commerciales (Tableau IV-V) reconnues internationalement.

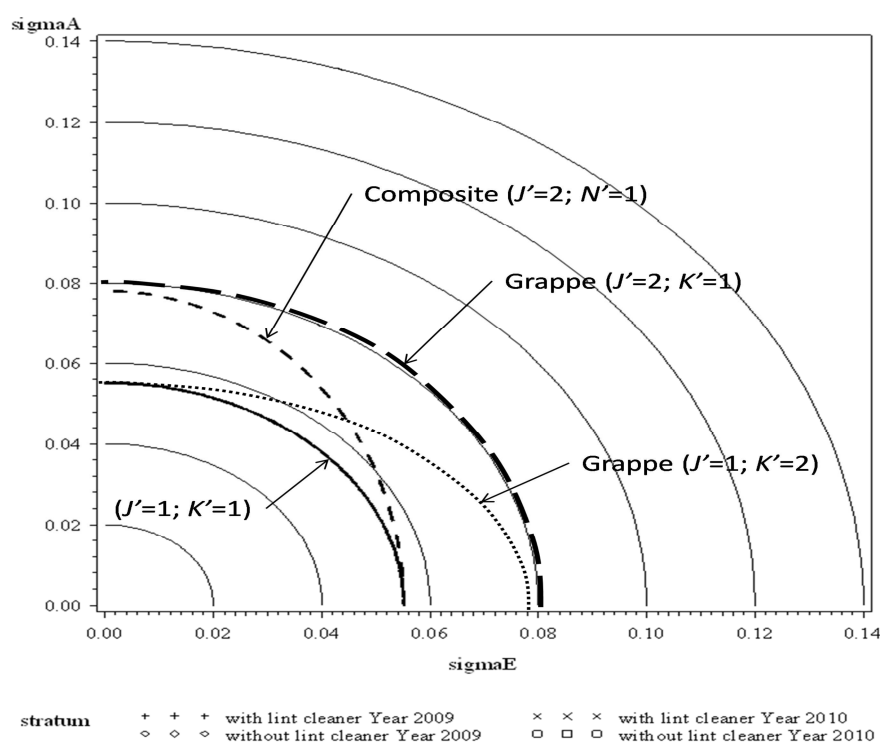


Figure IV-5 : Les différents types de courbe d'iso-variances ayant permis de déterminer le mode opératoire optimum.

IV.3. Résultats et discussions

IV.3.1. Résultats et discussions sur l'analyse des matières de référence

Les matières de référence sont des échantillons *Short Weak* (SW) et *Long Strong* (LS) que nous avons intercalés entre les échantillons prélevés (à 16 échantillons testés de distance) au cours des analyses sur CMI. Au cours des deux saisons d'analyse, nous avons utilisé deux générations de matières de référence dont les résultats de mesure figurent dans le Tableau IV-VI.

Tableau IV-VI : Résultats des mesures sur les standards.

	Mic (-)	UHML (mm)	UI (%)	Str (g.tex ⁻¹)	Rd (%)	X.b (-)
LS1	4.16	30.23	83.9	32.3	78.217	12.27
LS2	3.92	31.24	85.0	36.8	79.427	11.58
SW1	4.13	24.41	80.5	23.7	75.935	13.06
SW2	4.40	25.25	79.8	25.2	77.985	9.27

Au terme de l'analyse, les résultats de l'étude de l'effet heure et date sont consignés dans le Tableau IV-VII.

Tableau IV-VII : Niveau de signification des tests sur l'effet heure et date dans les analyses des standards de référence qui étaient intégrés dans les séries d'échantillons de balles. Les effets Date et Heure sont regroupés, les étoiles ou points représentent les p-value significatives à comparer avec la légende qui se trouve au dessus du tableau.

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						
LS1	Mic	UHML	UI	Str	Rd	X.b
Date	***	***	***	***	***	***
Heure		o	**	***	**	
Interaction Date:Heure	***	**	***	*	*	*
Polynôme Heure 3°			**			***
LS2	Mic	UHML	UI	Str	Rd	X.b
Date	*	***	***	***	***	***
Heure			o		*	***
Interaction Date:Heure		***	***		**	***
Polynôme Heure 3°				**	o	***
SW1	Mic	UHML	UI	Str	Rd	X.b
Date	***	***	***	***	***	***
Heure	*				***	
Interaction Date:Heure	**	***	**	**	***	**
Polynôme Heure 3°			***		*	***
SW2	Mic	UHML	UI	Str	Rd	X.b
Date	**	***	***	***	***	***
Heure				***	***	***
Interaction Date:Heure	*	**	***	***	***	***
Polynôme Heure 3°				***		***

Il ressort de l'analyse de ces données que l'effet date est indéniable sur les mesures des six caractéristiques technologiques, alors que l'effet heure n'est pas remarquable (bien qu'il y ait

quelques interactions entre la date et l'heure). Les variables les plus sensibles à l'heure sont Rd et +b (dénommé X.b).

La comparaison a été faite entre les moyennes globales de chacune des variables avec les valeurs de référence, et le constat est qu'aucun écart en moyenne ne sort des tolérances pour les variables. Cependant, en comparant les moyennes journalières avec les valeurs de référence, on constate que sur les six variables, deux (Str, +b) ne sont pas dans les normes. Il ressort que le temps d'analyse des échantillons des huit couches d'une balle avec les deux répétitions n'a jamais dépassé 20 minutes et nous en déduisons que le constat fait sur le Str et le +b est négligeable.

IV.3.2. Résultats et discussions sur l'analyse des données des échantillons prélevés

L'objectif est de déterminer les niveaux de variabilité intra-balle pour chaque caractéristique technologique mesurée et de déterminer une combinaison optimale du nombre d'échantillons de fibres par balle et du nombre de répétitions de mesures par échantillon de fibres, de façon à atteindre la précision désirée avec un coût de caractérisation minimal.

Les analyses technologiques des échantillons en provenance de différentes balles, d'une même usine, d'un pays ou d'une saison de collecte ont duré plusieurs jours. En revanche, le temps d'analyse des échantillons des huit couches d'une balle avec les deux répétitions n'a jamais dépassé 20 minutes d'affilée. Nous n'avons pas détecté d'effet heure d'analyse dans l'exploitation des données obtenues par les tests des matières de référence insérées dans les séries d'échantillons de fibres. Les conditions extérieures n'ont donc pas affecté les mesures technologiques au sein des balles. En conséquence, il n'a pas été nécessaire de corriger les observations sur les balles en fonction des mesures relevées sur les matières de référence. Nous avons donc étudié les données brutes obtenues de l'analyse des échantillons collectés sans aucune correction.

IV.3.2.1. Etude exploratoire

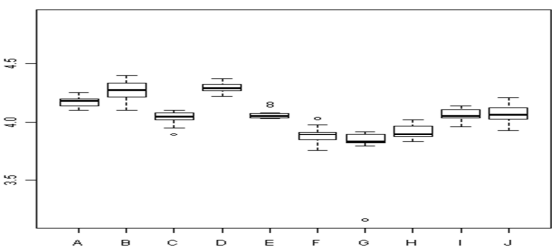
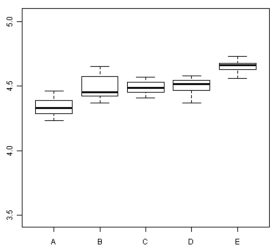
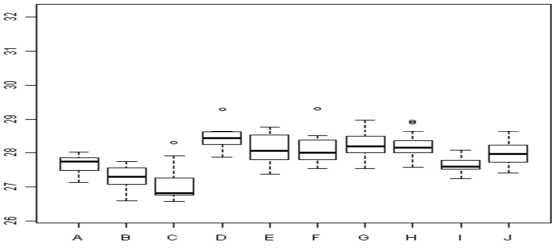
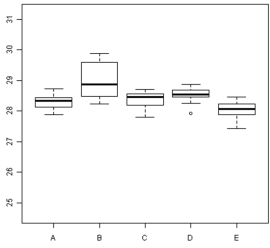
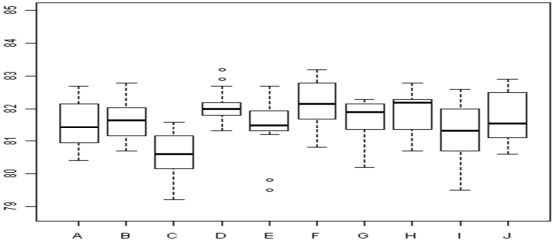
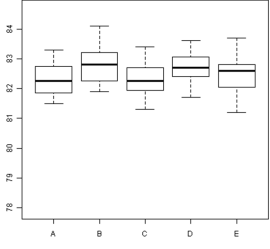
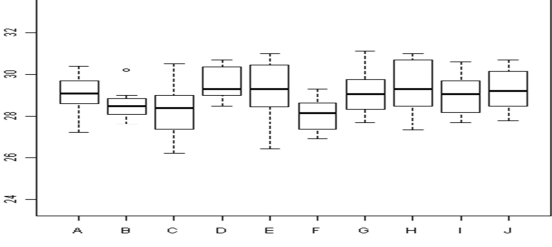
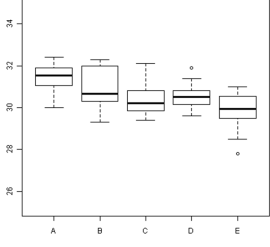
Nous avons commencé l'étude des données issues des échantillons prélevés en analysant la distribution des valeurs prises par chacune des caractéristiques technologiques (variables) au sein de la balle à deux échelles.

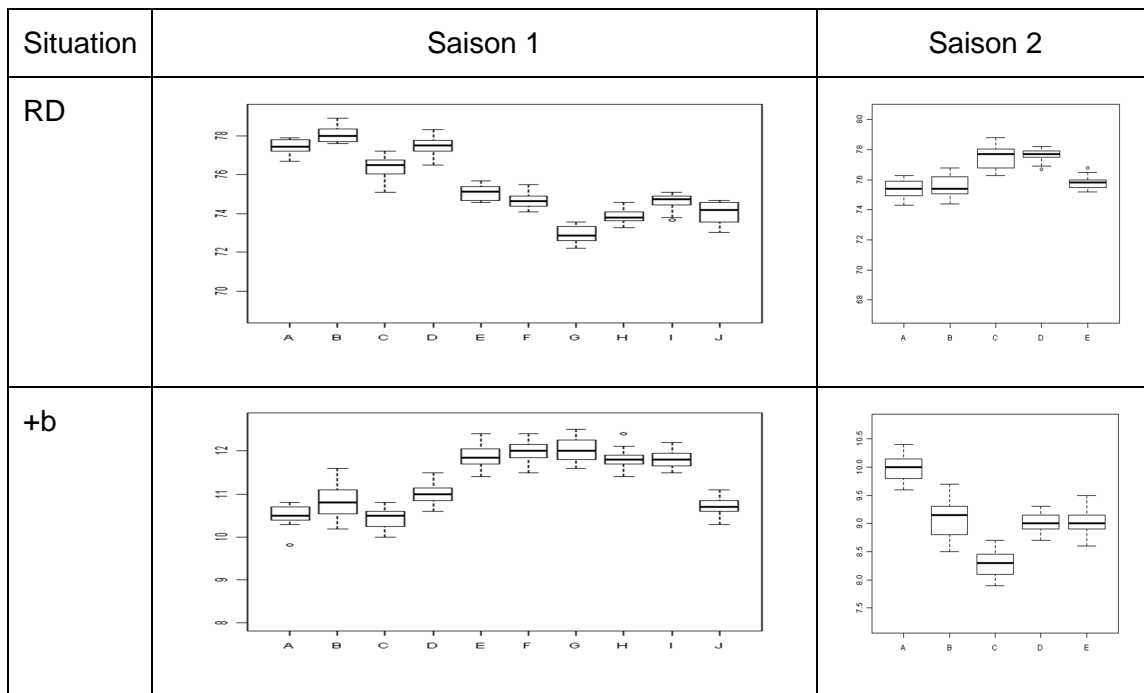
IV.3.2.1.1. Echelle usine et balle

Les boxplots par variable et par usine nous permettent de visualiser la dispersion des valeurs prises par les variables au sein d'une même balle toutes répétitions confondues. On remarque que la distribution des valeurs n'est pas la même pour chaque balle, d'une usine à

une autre et d'une saison à l'autre. Pour illustrer ces résultats, nous avons pris un exemple par caractéristique technologique pour une situation échantillonnée à la fois en saison 1 et en saison 2 (Tableau IV-VIII) : le rang de la balle (A, B, C...) est donné en abscisse et les valeurs des variables sont données en ordonnée. Tous les boxplots de toutes les situations sont en Annexe 1.

Tableau IV-VIII : Exemple de résultats de mesure des 6 caractéristiques technologiques pour une usine échantillonnée pendant les deux saisons d'expérimentation.

Situation	Saison 1	Saison 2
Mic		
UHML		
UI		
STR		



IV.3.2.1.2. Echelle usine, balle et répétition de mesure

D'une manière générale, les facteurs « couche » et « répétition » ont joué diversement selon la caractéristique technologique. Pour illustrer ces résultats, nous avons pris deux exemples contrastés par caractéristique technologique (Figure IV-6 à Figure IV-11) parmi les 186 graphes existants (31 situations x 6 caractéristiques). Pour chaque caractéristique technologique, deux boxplots illustrent les 8 résultats obtenus pour chaque combinaison « balle - répétition » : par exemple A-1 signifie « balle A » parmi n échantillonnées et répétition 1 parmi 2 répétitions de mesure effectuées.

Le facteur répétition a peu contribué à la variabilité observée du micronaire (MIC, Figure IV-6), de la réflectance (RD, Figure IV-10) et de l'indice de jaune (+b Figure IV-11). Pour les trois autres caractéristiques, il a en revanche contribué soit peu soit fortement selon la balle analysée (UHML, Figure IV-7 ; UI, Figure IV-8 ; STR, Figure IV-9).

IV.3.2.2. Détermination des variances d'échantillonnage pour une balle et proposition de modalités d'échantillonnage et d'analyse

Selon les modalités définies au paragraphe IV.2.2.2.3, nous avons représenté les graphes SigmaA vs SigmaE pour chacune des caractéristiques technologiques pour parvenir à une proposition de méthodologie optimale d'échantillonnage et d'analyse. Toutes les valeurs numériques de SigmaA et SigmaE qui sont représentées dans ces figures sont regroupées dans le Tableau IV-IX.

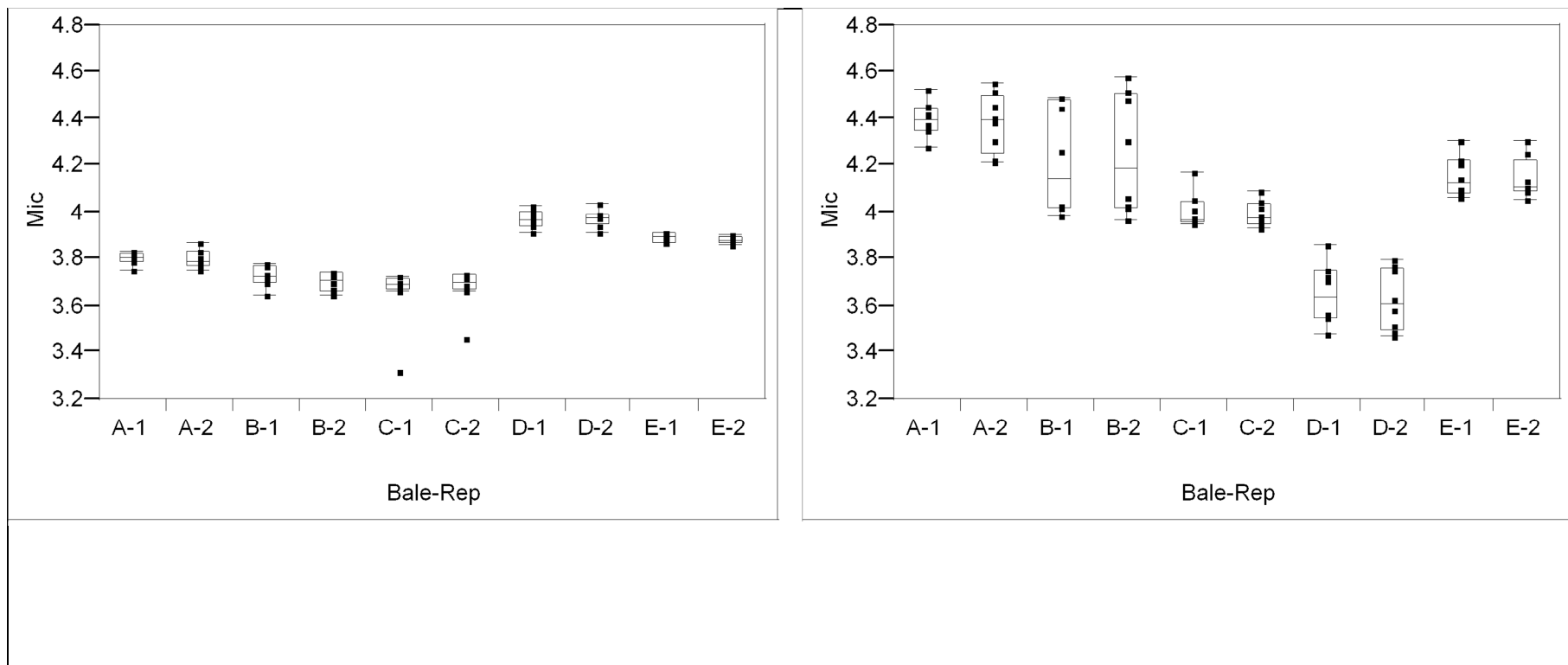


Figure IV-6 : Micronaire : Boxplots usine, balle et répétition. Chaque point représente le résultat d'une répétition de mesure d'un échantillon. (a) et (b) représentent des cas extrêmes observés dans les résultats.

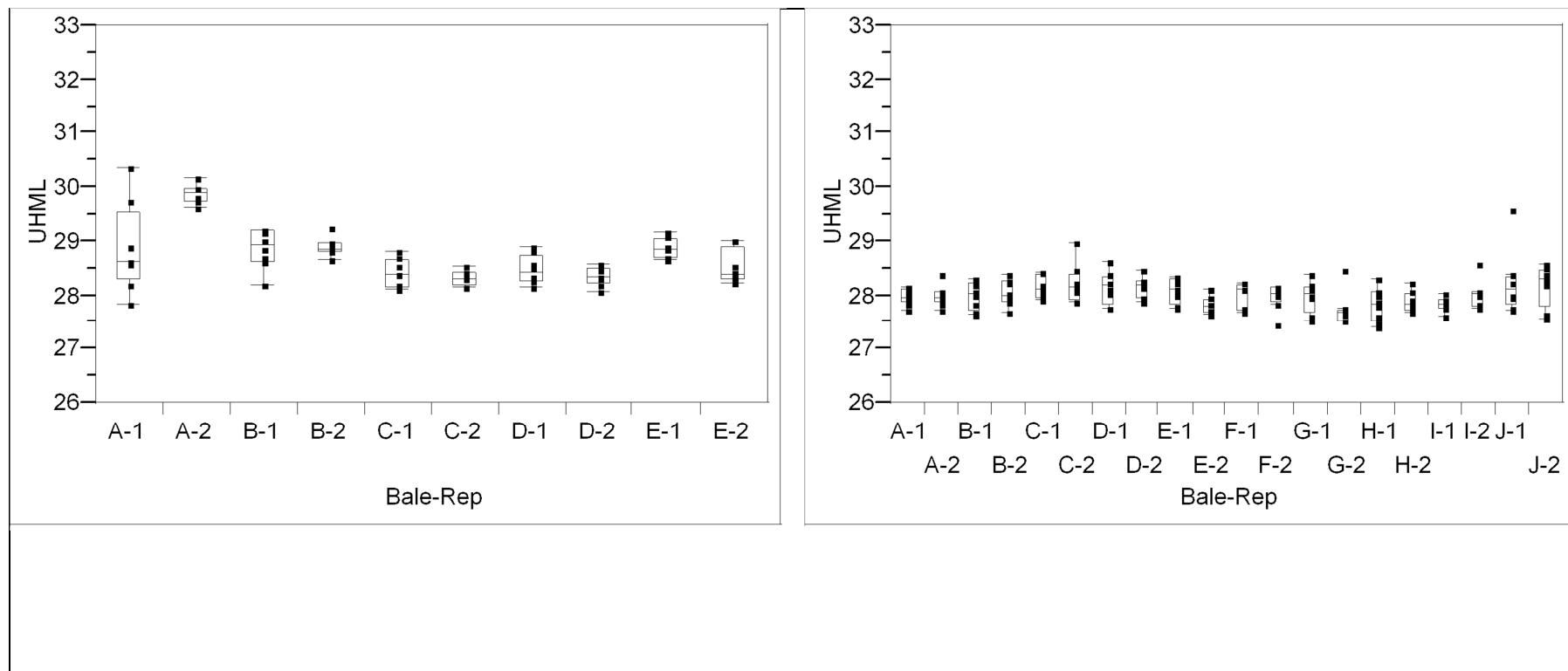


Figure IV-7 : Longueur UHML (mm) : Boxplots usine, balle et répétition. Chaque point représente le résultat d'une répétition de mesure d'un échantillon. (a) et (b) représentent des cas extrêmes observés dans les résultats.

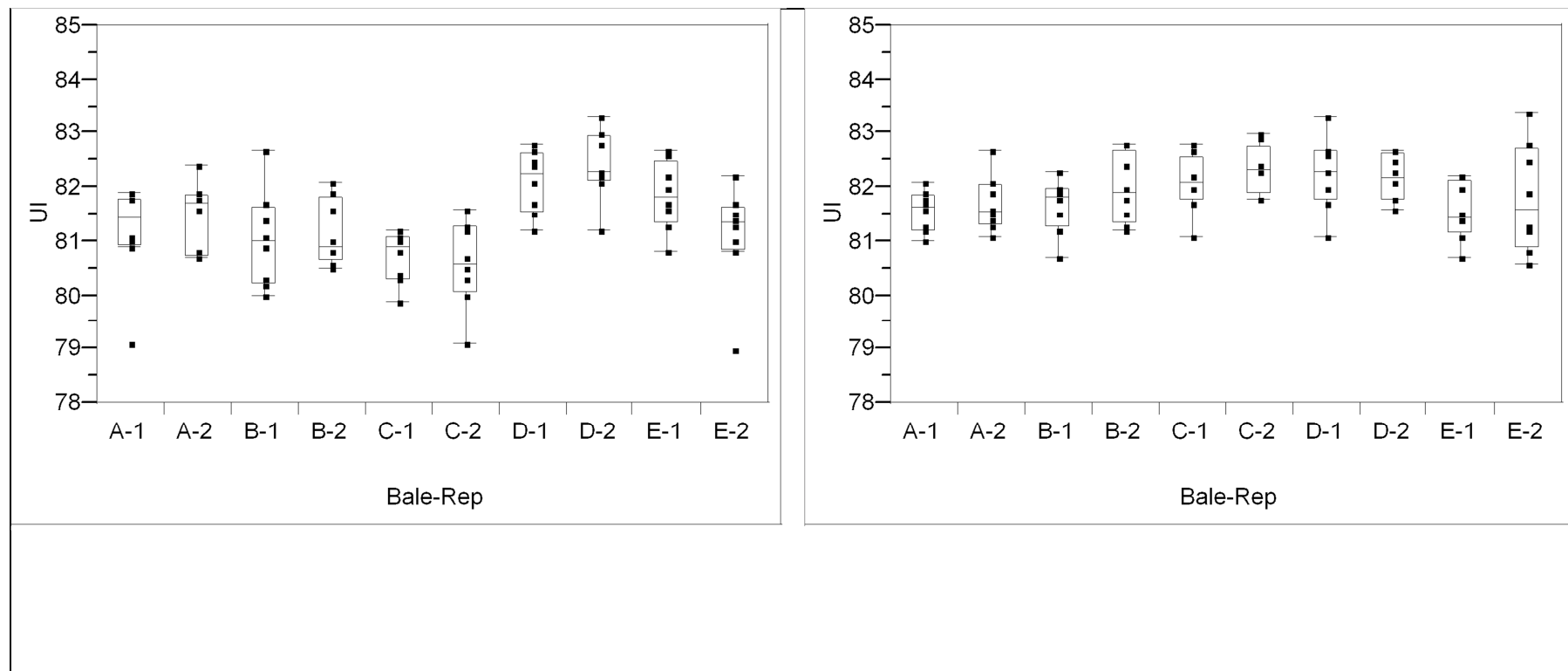


Figure IV-8 : Uniformité de longueur UI (%) : Boxplots usine, balle et répétition. Chaque point représente le résultat d'une répétition de mesure d'un échantillon. (a) et (b) représentent des cas extrêmes observés dans les résultats.

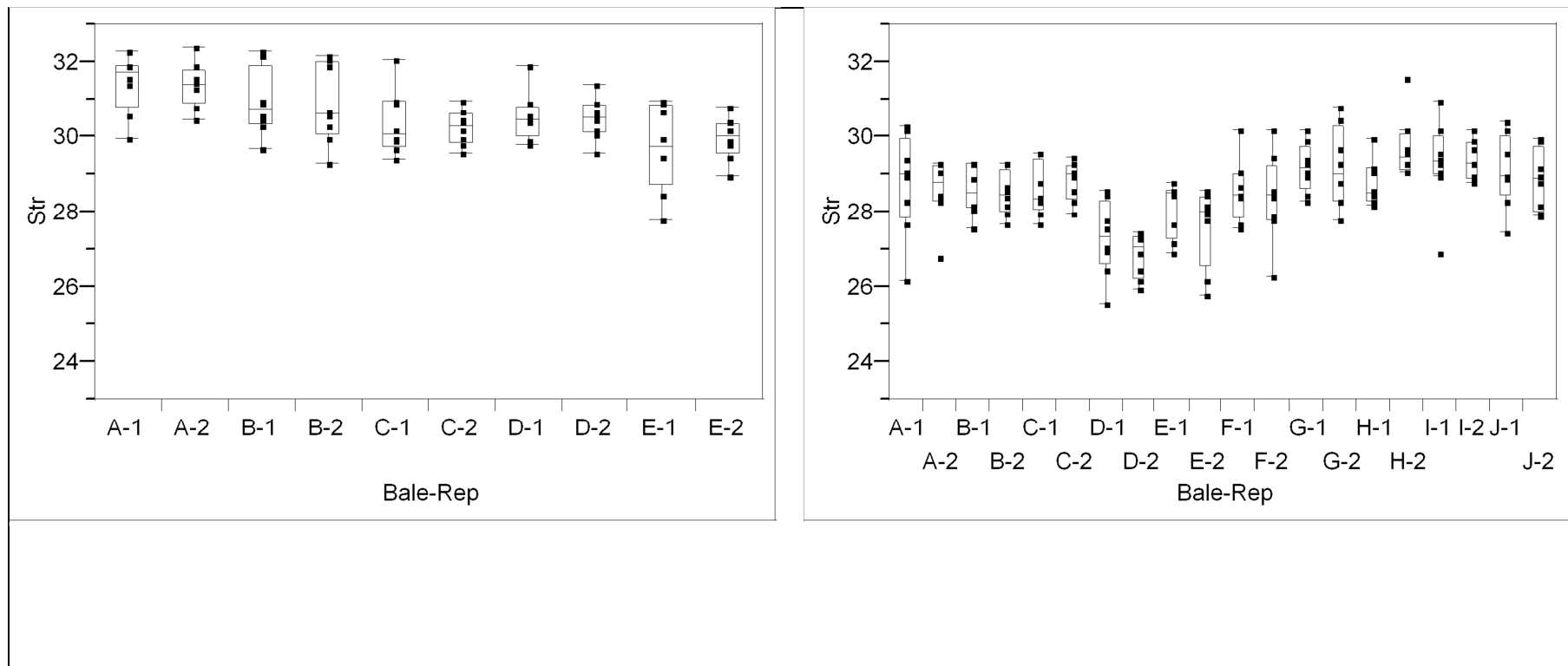


Figure IV-9 : Ténacité STR (cN/tex) : Boxplots usine, balle et répétition. Chaque point représente le résultat d'une répétition de mesure d'un échantillon. (a) et (b) représentent des cas extrêmes observés dans les résultats.

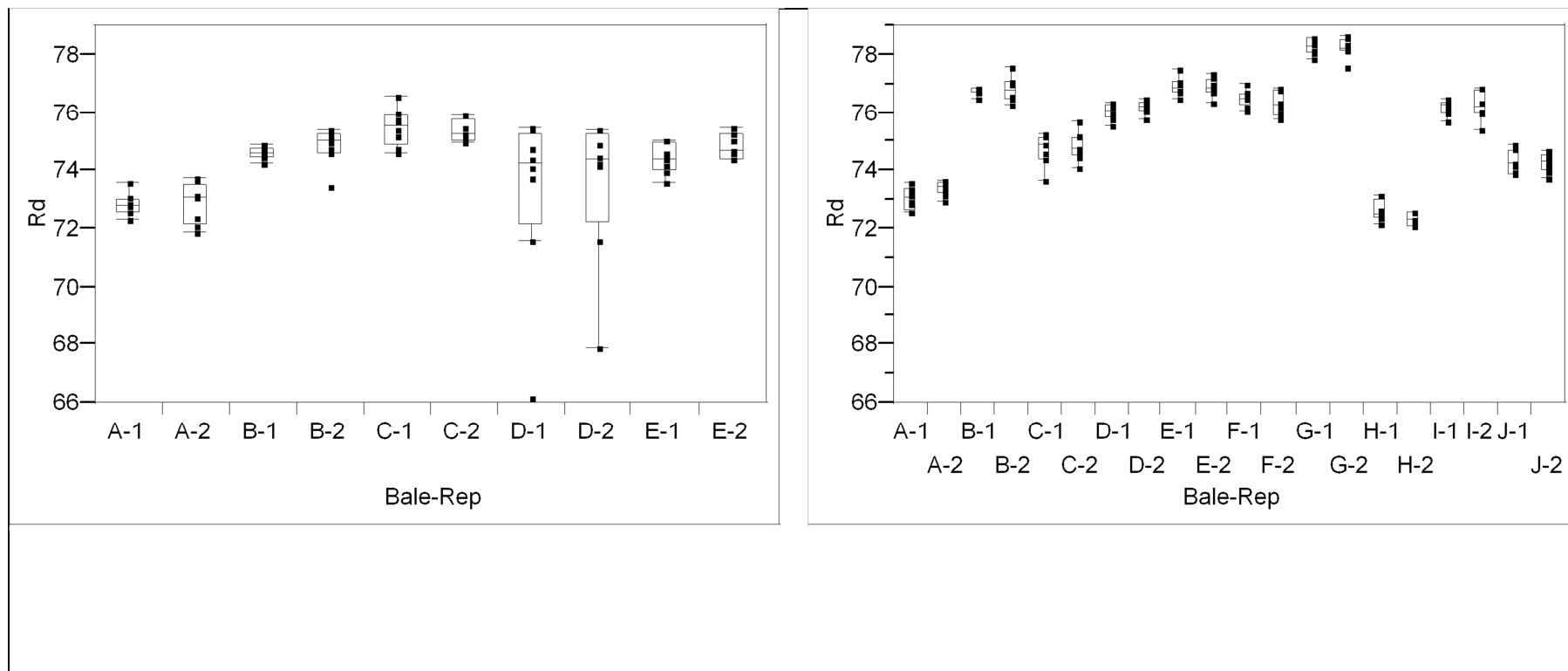


Figure IV-10 : Réflectance (%) : Boxplots usine, balle et répétition. Chaque point représente le résultat d'une répétition de mesure d'un échantillon. (a) et (b) représentent des cas extrêmes observés dans les résultats.

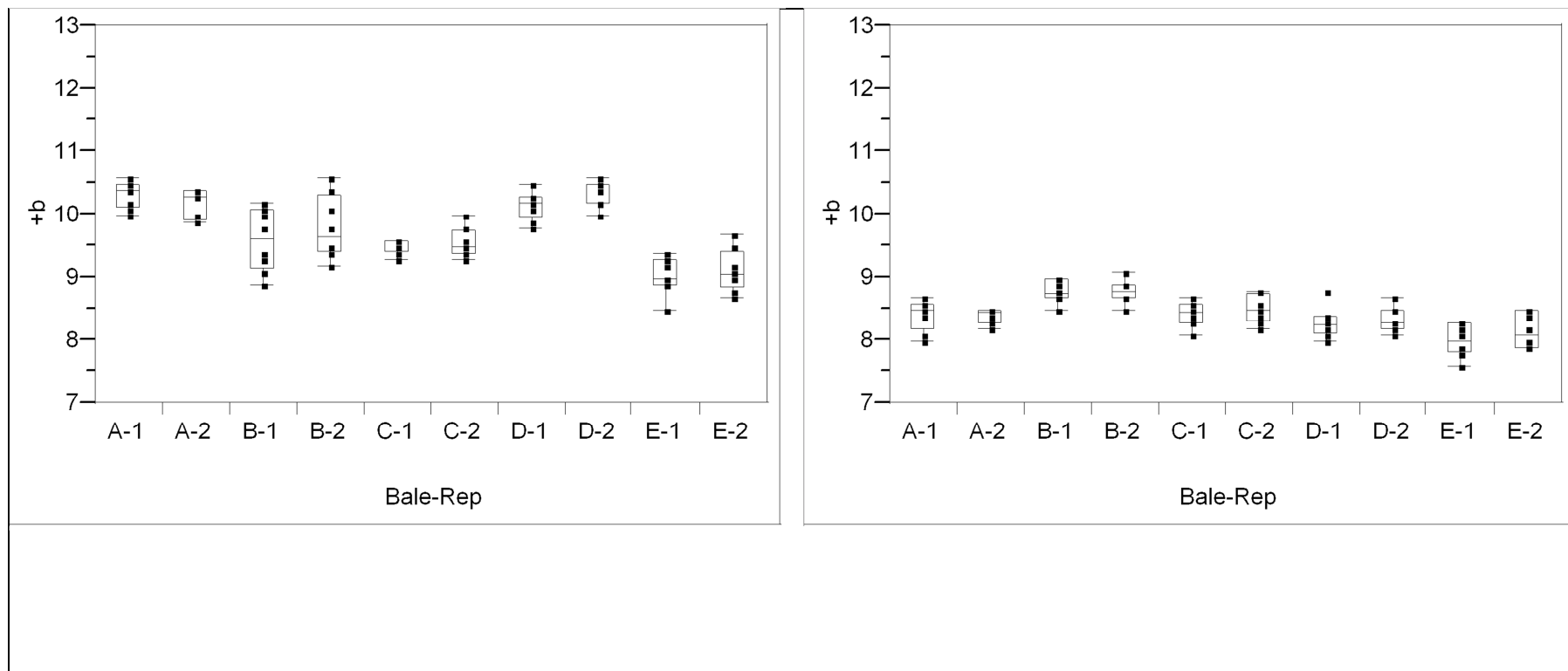


Figure IV-11 : Indice de jaune : Boxplots usine, balle et répétition. Chaque point représente le résultat d'une répétition de mesure d'un échantillon. (a) et (b) représentent des cas extrêmes observés dans les résultats.

Tableau IV-IX : Valeurs de SigmaA et SigmaE pour toutes les situations et toutes les caractéristiques.

Situation	Sigma	Mic (sans unité)		UHML (mm)		UI (%)		Str (g/tex)		Rd (%)		X.b (sans unité)	
		Saison 1	Saison 2	Saison 1	Saison 2	Saison 1	Saison 2	Saison 1	Saison 2	Saison 1	Saison 2	Saison 1	Saison 2
C1G1	A	0.0501	0.0546	0.1571	0.2362	0.2233	0.0000	0.3429	0.4781	0.3537	0.3832	0.1611	0.1303
	E	0.0634	0.0380	0.3496	0.2578	0.6815	0.5901	0.8863	0.6134	0.2752	0.4524	0.2127	0.2174
C1G2	A	0.0613		0.1801		0.2968		0.2968		0.8452		0.2033	
	E	0.0552		0.2961		0.6431		0.6514		0.3119		0.1516	
C1G3	A		0.0451		0.0000		0.0000		0.0000		0.4098		0.1130
	E		0.0422		0.4179		0.5522		0.7254		0.3988		0.1924
C2G1	A	0.0275	0.0461	0.1762	0.1651	0.0000	0.2159	0.3670	0.2064	0.2029	1.1313	0.1096	0.1056
	E	0.0475	0.0504	0.3455	0.3462	0.7565	0.6390	0.9765	0.6787	0.2840	0.3917	0.1335	0.1762
C2G2	A	0.0456		0.0948		0.0000		0.0000		0.3897		0.1480	
	E	0.0491		0.3301		0.7401		0.8522		0.3753		0.1541	
C2G3	A	0.0166		0.0000		0.0769		0.0000		0.4809		0.1305	
	E	0.0404		0.3705		0.7834		0.9231		0.3796		0.1768	
C2G4	A		0.0394		0.1649		0.0000		0.0000		0.0000		0.0184
	E		0.0338		0.3010		0.6325		0.7873		0.4427		0.1901
C3G1	A	0.0294		0.0000		0.2665		0.1880		0.2559		0.1137	
	E	0.0503		0.4247		0.7254		0.8515		0.3083		0.1492	
C3G2	A	0.0193	0.0109	0.0000	0.1669	0.2622	0.0605	0.0000	0.0000	0.1883	0.1839	0.0833	0.1298
	E	0.0426	0.0497	0.3293	0.3132	0.5772	0.5675	0.8612	0.5600	0.2984	0.2930	0.1551	0.1378
C3G3	A	0.0097		0.0582		0.0000		0.0000		0.2491		0.0988	
	E	0.0323		0.3227		0.6106		0.8819		0.3445		0.1647	
C3G4	A		0.0248		0.0000		0.3342		0.2063		0.3428		0.1781
	E		0.0377		0.4011		0.5917		0.4262		0.3389		0.1529
C4G1	A	0.0361		0.0933		0.2448		0.3472		0.4907		0.1733	

Estimation de la variance intra-balle et détermination des
modalités d'échantillonnage et de mesure sur CMI

Situation	Sigma	Mic (sans unité)		UHML (mm)		UI (%)		Str (g/tex)		Rd (%)		X.b (sans unité)	
		Saison 1	Saison 2	Saison 1	Saison 2	Saison 1	Saison 2	Saison 1	Saison 2	Saison 1	Saison 2	Saison 1	Saison 2
C4G2	E	0.0342		0.3855		0.6816		0.7014		0.3443		0.1356	
	A		0.0793		0.1783		0.0000		0.1989		0.2891		0.1604
	E		0.0412		0.1908		0.5279		0.5031		0.4057		0.1541
C4G3	A		0.0409		0.2243		0.3765		0.2252		0.0849		0.1471
	E		0.0404		0.2536		0.6448		0.5471		0.4352		0.2356
C5G1	A	0.0136		0.0000		0.0866		0.2783		0.5460		0.2193	
	E	0.0446		0.2774		0.4716		0.7098		0.4691		0.1822	
C5G2	A	0.0200		0.0586		0.2870		0.1150		0.2824		0.1157	
	E	0.0409		0.2550		0.4470		0.8542		0.2836		0.1516	
C5G3	A	0.0247	0.0341	0.0000	0.0000	0.2419	0.0000	0.0000	0.2766	0.3996	0.0000	0.0673	0.0672
	E	0.0478	0.0371	0.3703	0.4624	0.6222	0.6911	0.8087	0.7949	0.6423	0.4862	0.1828	0.2016
C5G4	A		0.0245		0.1022		0.2366		0.2060		0.0573		0.0947
	E		0.0424		0.2571		0.4742		0.6275		0.4908		0.1871
C6G1	A		0.0067		0.0000		0.0000		0.1677		0.0000		0.1010
	E		0.0387		0.3432		0.6341		0.6102		0.3365		0.1603
C6G2	A		0.0473		0.1803		0.0000		0.2816		0.3786		0.1388
	E		0.0579		0.3784		0.7897		0.7508		0.4626		0.1827
C6G3	A		0.0198		0.0000		0.1197		0.0000		0.1776		0.1125
	E		0.0439		0.3447		0.5715		0.5928		0.2745		0.1613
C7G1	A		0.0690		0.0000		0.1136		0.0000		0.1840		0.1618
	E		0.0399		0.2921		0.5477		0.6822		0.2962		0.1817
C7G2	A		0.1336		0.2252		0.1902		0.3672		0.2745		0.2427
	E		0.0431		0.3520		0.5013		0.5436		0.3046		0.1946
C7G3	A		0.0116		0.1973		0.0000		0.0000		0.2148		0.0867
	E		0.0430		0.2638		0.6082		0.6315		0.3517		0.2136

Estimation de la variance intra-balle et détermination des
modalités d'échantillonnage et de mesure sur CMI

Situation	Sigma	Mic (sans unité)		UHML (mm)		UI (%)		Str (g/tex)		Rd (%)		X.b (sans unité)	
		Saison 1	Saison 2	Saison 1	Saison 2	Saison 1	Saison 2	Saison 1	Saison 2	Saison 1	Saison 2	Saison 1	Saison 2
C8G1	A		0.0235		0.1956		0.0000		0.0000		0.2368		0.1363
	E		0.0231		0.3143		0.7422		0.8357		0.5507		0.1962
C8G2	A		0.0433		0.0000		0.3916		0.0000		0.5437		0.1710
	E		0.0463		0.3569		0.5631		0.7634		0.3628		0.2408
C8G3	A		0.0268		0.1337		0.0000		0.0000		0.0753		0.0134
	E		0.0367		0.2444		0.6453		0.6652		0.5399		0.2127

IV.3.2.2.1. Le Micronaire

La relation σ_A vs σ_E pour le micronaire (Figure IV-12), montre que les 31 situations échantillonnées sont plutôt distribuées verticalement. Cela signifie que les variances résiduelles sont à peu près les mêmes partout et que la variance inter-couche diffère d'un endroit et d'une saison à l'autre. Il est alors nécessaire d'augmenter le nombre de couches par balle et de faire une répétition de mesure. L'objectif est d'obtenir une mesure moyenne suffisamment précise de la balle pour le plus grand nombre de situations étudiées en respectant les tolérances commerciales et un risque de litige de 10%.

Les situations qui se retrouvent en dehors de l'ellipse telle que la situation C7G2 ont une grande variance inter-couche qu'on ne peut compenser en portant le nombre de couches à deux.

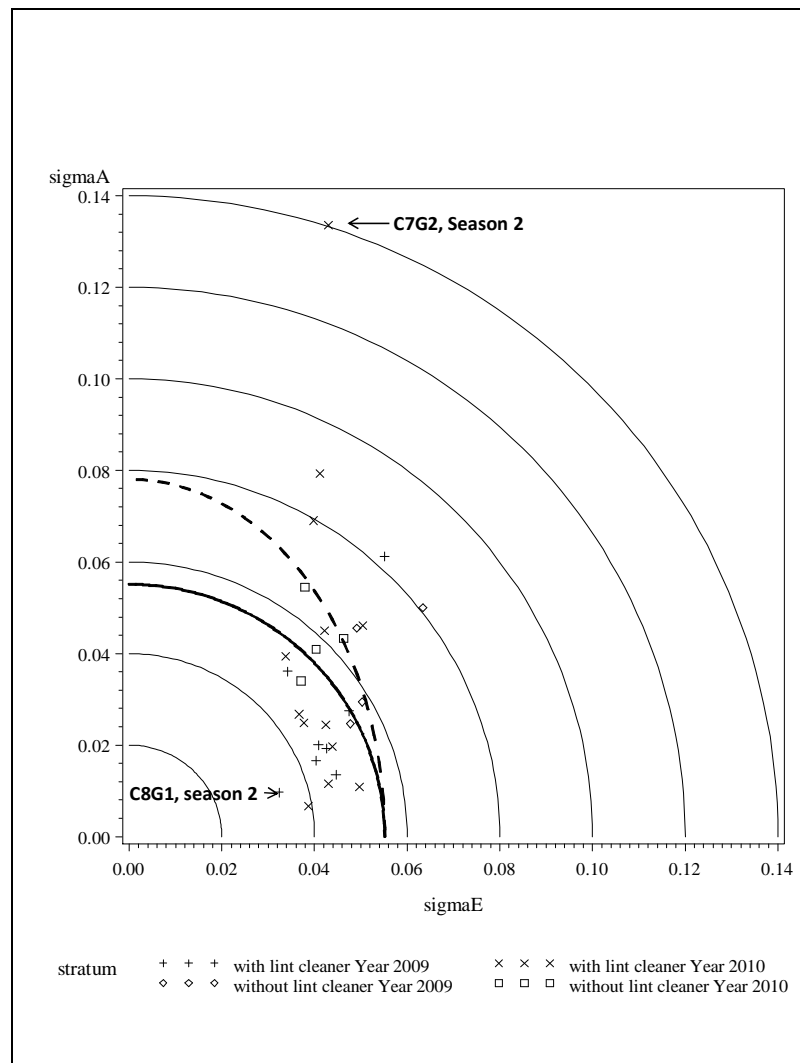


Figure IV-12 : Micronaire: Ecart-types inter-couches (SigmaA) vs intra-couche (SigmaE). Les balles qui proviennent des situations qui sont à l'intérieur du cercle en gras respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% avec une couche et une répétition de mesure. Les balles des situations qui sont à l'intérieur de l'ellipse en pointillé sont celles qui respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% mais avec deux couches et une répétition de mesure. *Jusqu'à la Figure IV-17, on y trouve également les deux situations extrêmes vues dans les boxplots vus plus haut.*

IV.3.2.2.2. La longueur UHML et son uniformité UI

Pour la longueur de fibre UHML (Figure IV-13), nous observons que 12 situations sont distribuées horizontalement alors que les autres situations sont proches de la première bissectrice. Cela indique un relatif équilibre entre les deux sources de variabilité. Cela traduit la nécessité d'augmenter le nombre d'échantillons et le nombre de répétitions de mesures pour obtenir une mesure moyenne suffisamment précise de la balle pour le plus grand nombre de situations étudiées. Les mêmes conclusions peuvent être tirées pour l'uniformité de longueur (Figure IV-14).

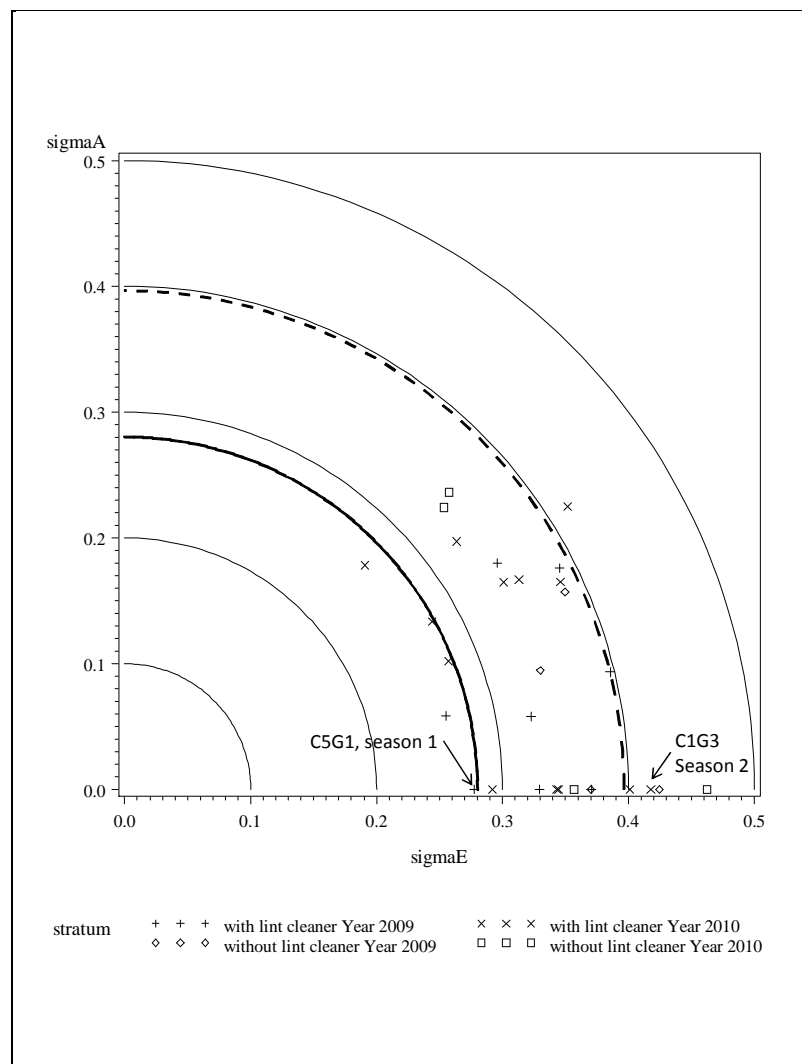


Figure IV-13 : UHML : Ecart-types inter-couches (SigmaA) vs intra-couche (SigmaE).

Les balles qui proviennent des situations qui sont à l'intérieur du cercle en gras respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% avec une couche et une répétition de mesure. Les balles des situations qui sont à l'intérieur du cercle

en pointillé sont celles qui respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% mais avec deux couches et deux répétitions de mesure.

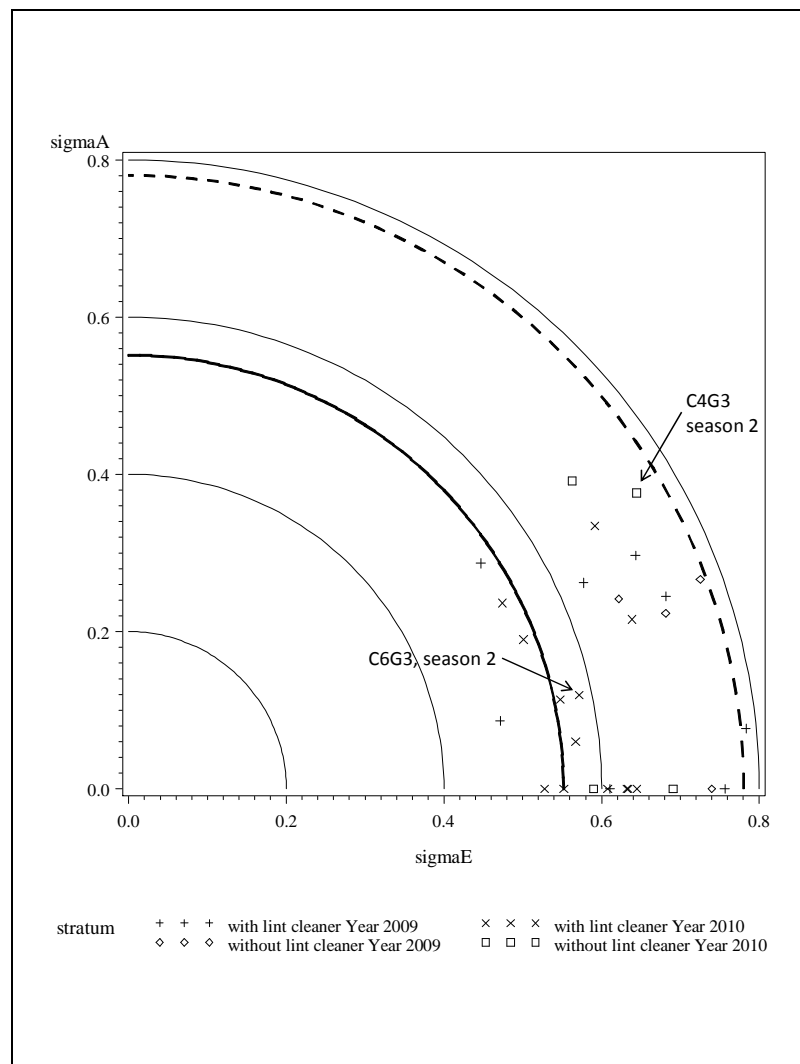


Figure IV-14 : UI: Ecart-types inter-couches (SigmaA) vs intra-couche (SigmaE). Les balles qui proviennent des situations qui sont à l'intérieur du cercle en gras respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% avec une couche et une répétition. Les balles des situations qui sont à l'intérieur de l'ellipse en pointillé sont celles qui respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% avec une couche et deux répétitions de mesure.

IV.3.2.2.3. La ténacité Str

La Figure IV-15 illustre la relation SigmaA vs SigmaE pour ce qui concerne la ténacité. Les points représentant les 12 situations échantillonnées en saison 1 et les 19 en saison 2 sont plutôt distribués horizontalement pour 13 situations. Les autres situations se situent en dessous de la première bissectrice montrant un effet répétition relativement plus élevé que l'effet couche. Cela traduit la nécessité d'augmenter préférentiellement le nombre de répétitions de mesures par échantillon pour obtenir une mesure moyenne suffisamment précise de la balle pour le plus grand nombre de situations étudiées.

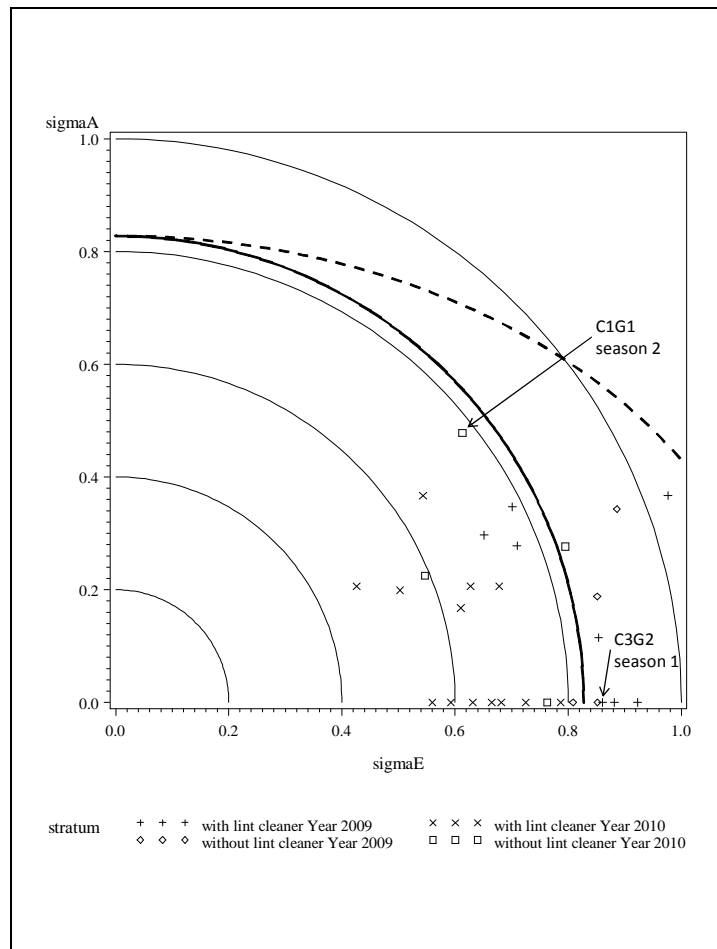


Figure IV-15 : Ténacité: Ecart-types inter-couches (SigmaA) vs intra-couche (SigmaE).

Les balles qui proviennent des situations qui sont à l'intérieur du cercle en gras respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% avec une couche et une répétition. Les balles des situations qui sont à l'intérieur de l'ellipse en pointillé sont celles qui respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% avec une couche et deux répétitions de mesure.

IV.3.2.2.4. Réflectance et Indice de jaune

La Figure IV-16 illustre la relation SigmaA vs SigmaE pour ce qui concerne la réflectance Rd. Les points sont plutôt distribués verticalement. Cela traduit la nécessité d'augmenter préférentiellement le nombre de couches par balle et de faire une répétition de mesures pour obtenir une mesure moyenne suffisamment précise de la balle pour le plus grand nombre de situations étudiées. Pour le degré de jaune, les mêmes conclusions peuvent être tirées de la Figure IV-17.

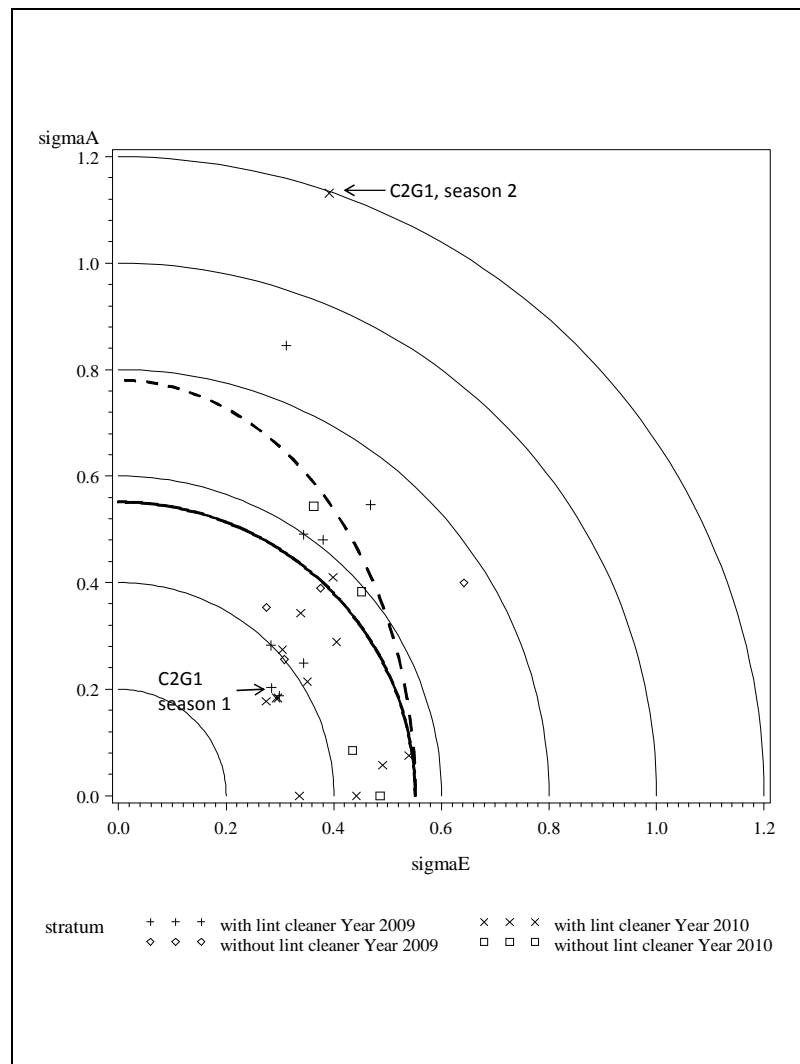


Figure IV-16 : Réflectance: Ecart-types inter-couches (SigmaA) vs intra-couche (SigmaE). Les balles qui proviennent des situations qui sont à l'intérieur du cercle en gras respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% avec une couche et une répétition de mesure. Les balles des situations qui sont à l'intérieur de

l'ellipse en pointillé sont celles qui respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% mais avec deux couches et une répétition de mesure.

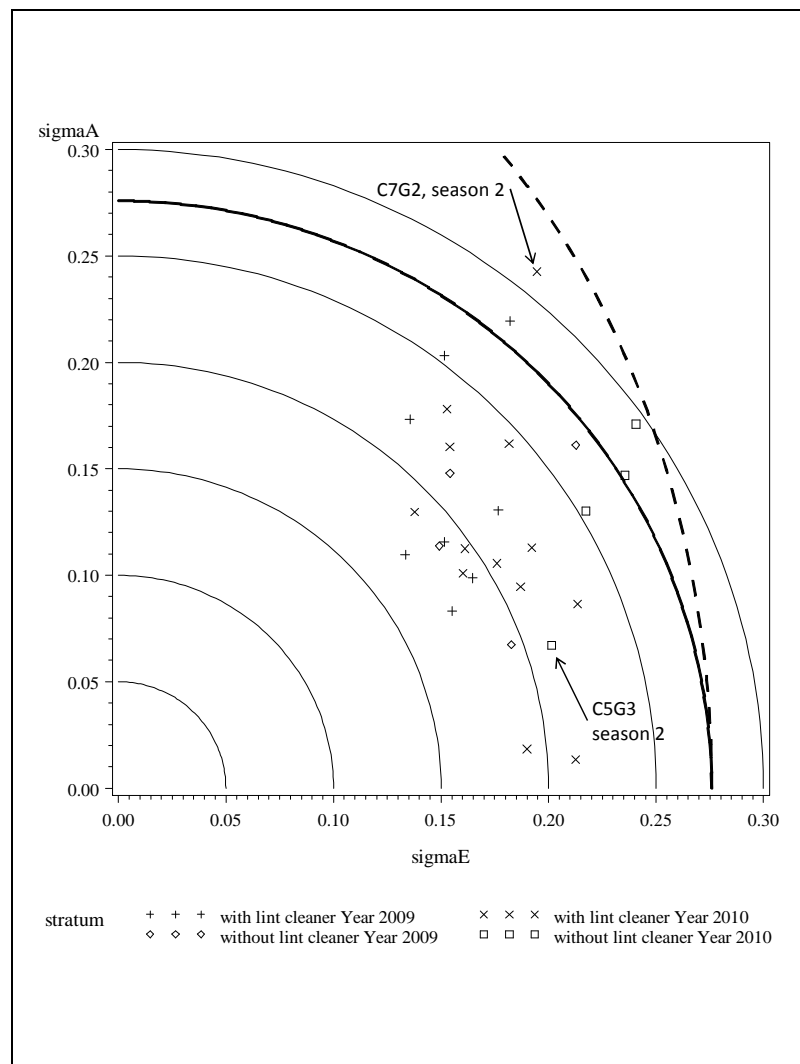


Figure IV-17 : Indice de jaune: Ecart-types inter-couches (SigmaA) vs intra-couche (SigmaE). Les balles qui proviennent des situations qui sont à l'intérieur du cercle en gras respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% avec une couche et une répétition de mesure. Les balles des situations qui sont à l'intérieur de l'ellipse en pointillé sont celles qui respectent les tolérances commerciales et un risque de litige de 10% mais avec deux couches et une répétition de mesure.

D'une manière générale, on constate que les effets de l'année de récolte (saison 1 ou 2) et de la présence ou non de *lint-cleaners* n'apportent pas d'aide à l'interprétation des variabilités observées. Pour les situations systématiquement à l'extérieur des courbes

limites, on peut suspecter un problème de gestion de l'alimentation en coton-graine de l'usine au moment des prélèvements.

Dans le cas de l'échantillonnage à 1 couche et 1 répétition de mesures, on constate que seules certaines situations sur les 31 étudiées garantissent un risque de litige inférieur à 10% (à l'intérieur de la courbe en gras). En exploitant les informations des paragraphes IV.2.2.2.2 et IV.2.2.2.3, on trace la courbe en pointillé illustrant le cas où J' échantillons sont prélevés et sont analysés avec une ou deux répétitions de mesures.

Le Tableau IV-X résume les conditions d'échantillonnage et de test pour limiter le risque de litige à moins de 10% pour chacune des caractéristiques technologiques selon les résultats représentés dans les Figure IV-12 à Figure IV-17. Ces conditions opératoires augmentent le nombre de situations où un risque de litige inférieur à 10% peut être garanti.

Tableau IV-X : Résumé du nombre de situations parmi 31 selon différents modes opératoires d'échantillonnage définis de la Figure IV-12 à Figure IV-17.

	J' = 1 échantillon K' = 1 répétition	J' = 2 couches en 1 échantillon composite N' = 1 répétition	J' = 1 échantillon K' = 2 répétitions	J' = 2 échantillons K' = 1 répétition
Mic		24		
UHML				26
UI				30
STR			30	
Rd		27		
+b		31		

Ainsi, nous pouvons réduire la variance d'échantillonnage σ_M pour chaque caractéristique technologique étudiée de la manière suivante :

- Pour le Micronaire, il faut augmenter le nombre de couches et en faire une analyse d'échantillon composite pour une répétition de mesure.
- Pour UHML et UI, il faut augmenter respectivement le nombre d'échantillons et le nombre de répétitions de mesures.
- Pour la ténacité Str, le facteur prépondérant est le nombre de répétitions qu'il faut augmenter.
- Pour la réflectance et l'indice de jaune, plusieurs couches pour une analyse d'échantillon composite semble raisonnable avec une répétition de mesures.

Dans la pratique J' est égal à deux maximum car on ne peut pas prendre plus de deux sabots sur une balle ; voici donc les possibilités d'échantillonnage et de types d'analyse sur CMI (Figure IV-18).

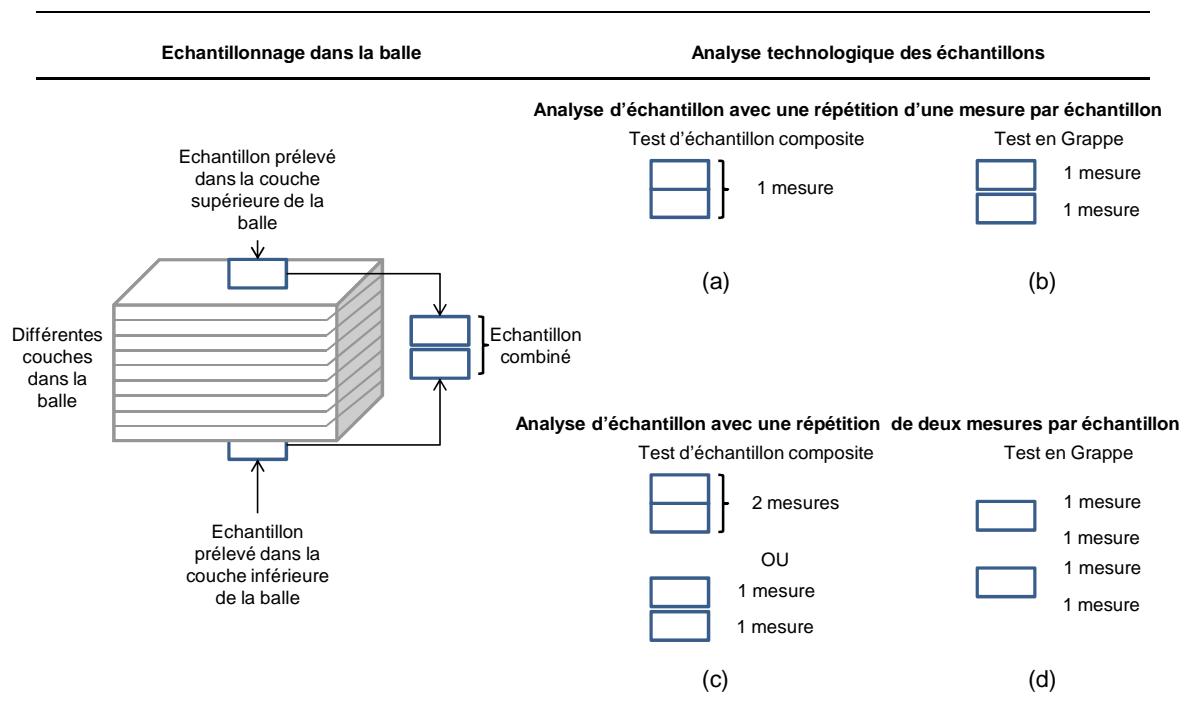


Figure IV-18 : Schéma des différentes possibilités pratiques d'échantillonnage et d'organisation des caractérisations technologiques à partir d'échantillons de balle.

En combinant toutes les connaissances acquises à ce point, il ressort de nos analyses la nécessité de prélever deux échantillons par balle. Compte-tenu du mode intégré de fonctionnement des CMI qui regroupe plusieurs modules de mesures au sein d'un seul appareil de mesure, nous proposons de réaliser une répétition du micronaire, une répétition de longueur-ténacité et une répétition de couleur par échantillon. Comme indiqué au paragraphe IV.2.1.3, une répétition de mesures correspond à une mesure du micronaire, deux mesures de longueur/ténacité et deux mesures de colorimétrie (réflectance et indice de jaune) (ASTM, 2005).

Notons que le mode de prélèvement d'échantillons en AOC est comparable à celui effectué aux USA, à savoir deux échantillons provenant des deux couches extérieures d'une même balle (USDA, 2001). En revanche les méthodes d'analyse de ces échantillons et les nombres de mesures par échantillon sont différents (USDA, 2001). La comparaison des deux méthodes opératoires se trouve dans le Tableau IV-XI.

Pour les mesures de colorimétrie, on peut émettre l'hypothèse que la différence de nombre de mesures par balle dans les pays AOC et aux USA est liée au mode de récolte du coton-graine. En effet, les pays AOC réalisent une récolte manuelle alors qu'elle est mécanique aux USA. On émet l'hypothèse que les cotons récoltés à la main sont moins chargés que les cotons récoltés à la machine (Anthony, Meredith et al., 1988) ; cela induirait une moindre variabilité des résultats de colorimétrie en AOC. Une autre explication serait l'efficacité plus variable des processus de nettoyage de coton-graine et de fibres d'un coton initialement plus chargé aux USA.

Ainsi, suivant les résultats que nous avons présentés dans cette étude, à l'échelle intra-balle, les fibres seraient de caractéristiques technologiques plus homogènes en Afrique qu'aux USA pour la colorimétrie et moins homogènes pour la longueur et la ténacité. Quant au micronaire l'homogénéité est la même.

Tableau IV-XI : Comparaison de procédures de test sur CMI : nombre de mesures par balle aux USA et dans notre proposition pour l'AOC.

Caractéristique	Nbre d'échantillons par balle	Type d'analyse	Nbre de répétitions	Nbre de mesures par échantillon	Nbre total de mesures par balle
USA					
Micronaire	2	Composite	1	1	1
UHML	2	Grappe	1	1	2
UI	2	Grappe	1	1	2
STR	2	Grappe	1	1	2
Rd	2	Grappe	1	2	4
+b	2	Grappe	1	2	4
Proposition pour l'Afrique de l'Ouest et du Centre					
Micronaire	2	Composite	1	1	1
UHML	2	Grappe	1	2	4
UI	2	Grappe	1	2	4
STR	2	Grappe	1	2	4
Rd	2	Composite	1	2	2
+b	2	Composite	1	2	2

Nos préconisations de modalités d'échantillonnage et d'analyse permettent de limiter le risque de litige par balle à moins de 10% dans la presque totalité des situations rencontrées. Comme ces situations ont été sélectionnées aléatoirement dans des listes exhaustives, leur représentativité statistique permet d'affirmer que l'application de nos préconisations limite le risque de litige à moins de 10% dans la presque totalité des autres situations de l'AOC.

Notre étude s'attache aux conditions de répétabilité en considérant comme sources de litige les fluctuations d'échantillonnage au sein d'une balle et la variabilité des mesures au sein d'un laboratoire. En revanche, nous n'avons pas considéré les conditions de reproductibilité ; en effet, notre étude n'a pas pris en compte la différence de niveaux de lecture qui peut être observée entre laboratoires.

Notre étude a également porté sur deux campagnes de récolte du coton. Or, un niveau donné de variabilité n'est jamais acquis et il peut varier en fonction des facteurs locaux de production (écologie, variété, dates de semis, etc.) et des effets année de culture, des processus de récolte, de gestion et d'égrenage du coton-graine. Les mesures initiales de variabilité que nous avons effectuées à l'occasion de cette étude pourraient être complétées par un contrôle continu pour chaque situation afin de garantir le risque de litige annoncé pour toutes les situations.

Enfin, nous avons ainsi limité à 10% le risque de litige sur chaque balle. Les contrats commerciaux portent plus généralement sur des lots de plusieurs balles et c'est sur chaque lot que s'appliquent des Règlements Généraux des Associations Cotonnières. Le risque de litige par lot est alors facile à déduire à l'aide de calculs élémentaires de probabilité, mais cela ne concerne pas l'étude actuelle.

IV.4. Conclusion

Nous venons de mesurer les niveaux de variabilité intra-balle de six caractéristiques technologiques des fibres de coton dans huit pays producteurs de coton de l'Afrique de l'Ouest et du Centre. Trente-et-une situations représentatives des conditions de production et d'égrenage ont été choisies. Des échantillons de fibre ont été prélevés dans huit couches à l'intérieur de balles sélectionnées issues des situations choisies selon un protocole préétabli sur deux saisons d'égrenage. Les analyses de ces échantillons ont été réalisées dans des conditions opératoires permettant de garantir la répétabilité des mesures.

Les variances intra-balle ont été décomposées en variance d'échantillonnage d'une part et variances de répétitions des mesures d'autre part. Cela a permis d'établir des propositions de modalités d'échantillonnage et de réalisation des mesures technologiques qui respectent la plupart du temps les tolérances internationales et les risques de litige admis dans le commerce du coton fibre produit en Afrique de l'Ouest et du Centre.

Chapitre V

Etude de la variabilité inter balles : première approche de l'amélioration de la précision de mesure par la méthode du krigage

Chapitre V. Etude de la variabilité inter balles : première approche de l'amélioration de la précision de mesure par la méthode du krigeage.

V.1. Introduction

Au chapitre précédent nous avons évalué le niveau de variabilité intra-balle des caractéristiques technologiques de la fibre de coton en Afrique de l'Ouest et du Centre. Nous avons vu aussi comment atteindre la précision de mesure de la valeur moyenne des caractéristiques technologiques de la balle en augmentant le nombre d'échantillons et de répétitions de mesure par balle. Mais le prélèvement de plusieurs échantillons par balle et la réalisation de plusieurs mesures par échantillon représente un coût pour les producteurs de coton. Si l'on revient à la pratique du classement manuel et visuel, les classeurs n'examinent pas en réalité les échantillons un par un comme on procède avec les instruments, mais ils les étalent d'abord sur une table, regardent leur l'homogénéité et procèdent à l'appréciation de la qualité. L'homogénéité du lot permet de classer l'ensemble du lot sans avoir à apprécier les balles une par une. Ils gagnent ainsi du temps, et améliorent la précision de leurs évaluations par l'observation des balles adjacentes. Les mesures instrumentales, au contraire, ne valorisent pas cette possible homogénéité : il faudrait qu'elles bénéficient d'informations analogues au « coup d'œil » du classeur qui n'a pas son équivalent sur les instruments.

Si aux Etats-Unis la production d'un champ homogène suffit pour remplir un camion de coton-graine, dans les pays AOC les conditions de production sont différentes ; les champs sont plus petits et moins homogènes et la production de plusieurs champs est parfois nécessaire pour remplir un camion. Cependant l'égrenage assure un mélange continu du coton dont on peut penser qu'il lisse aussi les variations de qualité technologique du coton qui entre à l'usine d'égrenage. On peut donc penser que les variations de la qualité des fibres ne peuvent pas être en permanence abruptes et désordonnées, mais qu'au contraire elles doivent être lisses.

Nous émettons l'hypothèse que ce lissage se traduit par des autocorrélations des caractéristiques technologiques mesurées sur des balles successives de coton. Sous cette hypothèse, nous proposons une méthode statistique qui devrait permettre d'améliorer la

précision de la détermination de la moyenne de chaque balle sans augmenter le nombre de répétitions : le krigeage.

Le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale, parfois considérée comme la plus juste d'un point de vue statistique, qui permet une estimation linéaire basée sur l'espérance mathématique et sur la variance de la donnée spatialisée. À ce titre, le krigeage se base sur le calcul, l'interprétation et la modélisation du variogramme qui est la fonction reliant l'écart quadratique moyen entre données à la distance qui sépare leurs lieux d'acquisition (Wikipedia).

V.2. Variabilité inter balles et possibilité d'interpolation

V.2.1. Expérimentations : échantillonnage et mesure sur CMI

Pour étudier la variabilité inter balles, notre expérimentation a été conduite également sur deux saisons de production 2008-2009 (saison 1) et 2009-2010 (saison 2). Les usines échantillonnées sont celles qui ont été choisies pour l'estimation de la variance intra-balle (chapitre IV) : les échantillons ont été prélevés au cours de la même journée de production. Chaque échantillonnage consiste à retenir 200 balles consécutives au sein de la production de l'usine au cours de la première saison et 100 balles consécutives pendant la deuxième saison. De chaque balle on retient l'échantillon classique obtenu à l'aide d'un sabot au moment du pressage (Figure V-1). Parmi les 200 balles et 100 balles consécutives échantillonnées par usine selon la saison d'expérimentation figurent respectivement les 10 balles et 5 balles prélevées par usine et qui ont fait l'objet de l'estimation de la variance intra-balle (chapitre IV). Pour l'ensemble des huit pays, nous avons prélevé 2919 échantillons pendant la saison 1 et 1367 échantillons pendant la saison 2 (Tableau V-I). Afin de préserver la confidentialité des données des pays qui ont participé à l'enquête, les pays et les usines retenus ont été codés.

Tous les échantillons de l'étude ont été caractérisés dans un laboratoire contrôlé, dans les mêmes conditions que les échantillons qui ont servi à l'estimation de la variance intra-balle (Chapitre IV).

L'ordre de passage de ces échantillons sur la CMI a été totalement randomisé afin de limiter des dérives possibles dues au temps. Chaque échantillon est répété deux fois ; un bloc de première répétition et un second bloc de deuxième répétition de mesures sur les 100 ou 200 balles selon la saison. A la fin de chaque train de 20 échantillons testés, nous avons

testé un couple de matières de référence, un *short weak* (SW) et un *long strong* (LS) dans les mêmes conditions d'analyses.

Les caractéristiques technologiques mesurées sont les mêmes que pour le chapitre IV.

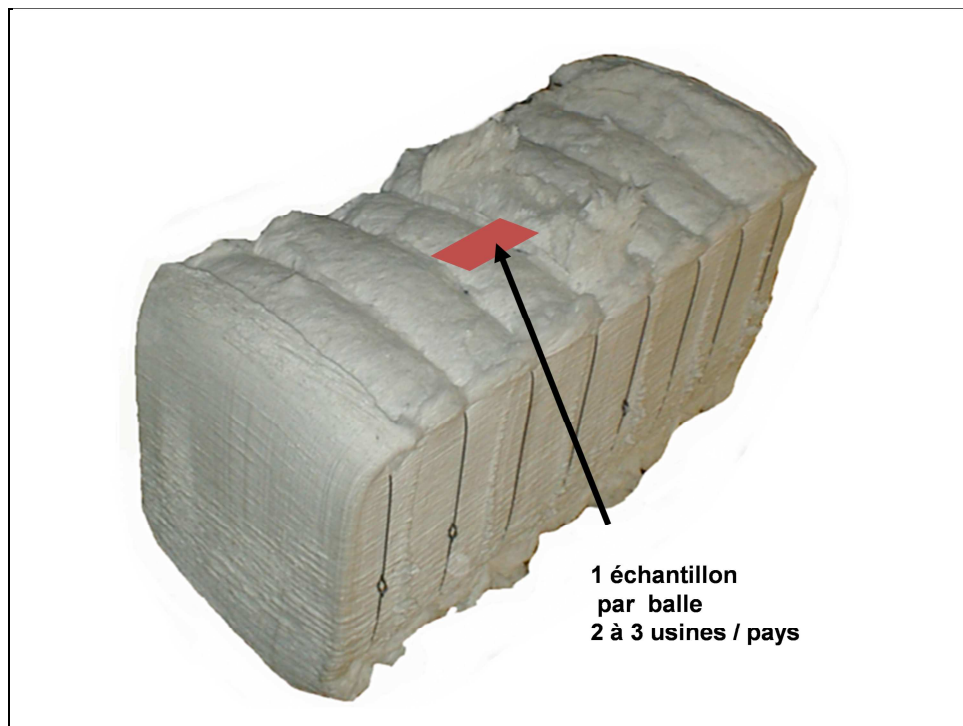


Figure V-1 : Modalités d'échantillonnage des balles dans l'expérimentation de validation de l'interpolation des valeurs des balles.

Tableau V-I : Nombres de balles dans lesquelles des échantillons ont été prélevés par saison pour l'expérimentation.

Situations	Nb balles Saison 1	Nb balles Saison 2	Nb total
C1G1	199	100	299
C1G2	200		200
C1G3		100	100
C2G1	180	97	277
C2G2	199		199
C2G3	192		192
C2G4		100	100
C3G1	200		200
C3G2	200	97	297
C3G3	200		200
C3G4		87	87
C4G1	200		200
C4G2		100	100
C4G3	201		201
C5G1	200		200
C5G2	397		397
C5G3	351	99	450
C5G4		88	88
C6G2		100	100
C6G3		100	100
C8G1		99	99
C8G2		100	100
C8G3		100	100
Total général	2919	1367	4286

V.2.2. Méthode statistique d'analyse des données

Dans le cas de cette l'étude, les données sont les résultats des mesures technologiques d'échantillons prélevés sur 200 balles successives en saison 1 et sur 100 balles successives en saison 2. Le temps nécessaire pour analyser le bloc constitué d'une seule répétition est de 12 à 24 fois supérieur à celui nécessaire pour analyser une répétition des 8 couches d'une balle au chapitre IV. Par conséquent, une éventuelle dérive d'étalonnage pourrait fausser les mesures ; une correction à l'aide des témoins a été envisagée au paragraphe résultats (Voir V.2.3). Toutefois, avec ou sans correction de dérive, comme l'ordre de passage des échantillons a été randomisé pour les analyses, les erreurs de mesure liées à l'étalonnage de l'instrument de mesure sont réparties au hasard sur l'ensemble des balles et n'engendrent pas d'artéfact de corrélation entre balles successives.

V.2.2.1. Modèle statistique

La production de coton-fibre à l'égrenage est vue ici comme un processus continu, donc les variations de qualité des fibres sont supposées assez lisses pour être interpolées ; en d'autres termes elles sont autocorrélées. Ainsi nous émettons l'hypothèse que les données issues d'échantillons proches dans le flot de coton sont plus proches que des données issues d'échantillons éloignés dans le même flot de coton. Si cette hypothèse est vérifiée, nous pouvons alors interpoler les valeurs des caractéristiques technologiques de la fibre de coton à chaque endroit de la balle en se fiant à ce qui est mesuré dans les endroits voisins.

Le modèle statistique proposé va servir pour explorer les données accumulées dans l'expérimentation présentée ci-dessus au même titre qu'il le sera dans une expérimentation décrite plus bas. Aussi, la présentation suivante est faite de manière à couvrir son utilisation dans les deux cas.

Pour vérifier cette hypothèse, plusieurs méthodes reposant sur la statistique des séries chronologiques ou sur la géostatistique sont possibles. Nous avons choisi la géostatistique pour deux raisons : 1) les échantillons ne sont pas forcément régulièrement espacés, ce qui gênerait le calcul de la fonction d'autocorrélation et 2) la prédiction dont nous avons besoin finalement est celle de la valeur moyenne d'une balle, à partir de la valeur ponctuelle mesurée sur une extrémité de cette balle et de ses voisines. Cette démarche est typiquement celle du krigeage en géostatistique, mise au point au départ pour estimer la richesse d'un minerai dans un gisement de richesse variable, à partir de sondages ponctuels (Cressie, 1993).

Dans un premier temps, pour analyser les données des échantillons prélevés, nous avons représenté graphiquement les données brutes des 200 balles et 100 balles successives (répétition 1 et répétition 2), variable par variable et usine par usine. Cela nous a permis de voir si la répartition des données obtenues est assez lisse au cours de la journée de production pour être améliorée par interpolation ou si au contraire elle présente trop de d'irrégularité.

Dans un deuxième temps, nous avons envisagé d'interpoler la mesure de la première répétition de la balle et de valider le résultat obtenu par la mesure de la deuxième répétition. Les résultats ont été analysés indépendamment pour chacune des caractéristiques.

Chaque caractéristique technologique est une variable définie par la fonction aléatoire $Y(x)$ de la position x de la balle i dans la série. Avec un seul échantillon-sabot au bas de chaque balle et des balles régulièrement espacées dans la production, nous avons assimilé x au

numéro de la balle i . Le modèle statistique que nous avons posé pour cette variable observée $Y(i)$ est la somme d'une variable aléatoire U_i , non observée, qui est la vraie valeur de la caractéristique technologique considérée au point x , et de E_{ij} , l'erreur d'échantillonnage et de mesure pour l'unique échantillon prélevé dans cette couche.

Le modèle s'écrit alors : $Y_i = U_i + E_{ij}$, avec E_{ij} iid suivant une loi normale centrée.

Soit h la distance entre deux observations.

Supposons que U soit stationnaire au deuxième ordre (sa valeur dépend de l'espérance et de la variance);

- l'espérance $E(U)$ est une constante ;
- la covariance entre deux réalisations U_i et U_{i+h} ne dépend que de la distance h qui les sépare :

$$Cov(U_{i+h}, U_{i+h}) = C(h)$$

Déterminons la relation entre variogramme $\gamma(h)$ (dissemblance) et fonction de covariance $C(h)$ (ressemblance) :

γ est le (semi) – variogramme : $\gamma_U(h) = \frac{1}{2} E[(U_{(i)} - U_{(i+h)})]^2$

$$\begin{aligned} 2\gamma(h) &= E[(U_{(i)} - U_{(i+h)})]^2 \\ &= Var(U_{(i)} - U_{(i+h)}) \text{ car } [E(U_{(i)} - U_{(i+h)})]^2 = 0 \\ &= Var(U_{(i)}) + Var(U_{(i+h)}) - 2Cov(U_i, U_{i+h}) \\ &= Cov(U_i, U_i) + Cov(U_{i+h}, U_{i+h}) - 2Cov(U_i, U_{i+h}) \\ 2\gamma(h) &= 2C(0) - 2C(h) \end{aligned}$$

La relation entre la fonction de covariance et du variogramme s'écrit $\gamma(h) = C(0) - C(h)$.

Dans ce chapitre, nous avons utilisé une estimation robuste du variogramme, suivant la méthode présentée par (Cressie, 1993) mise en œuvre avec la procédure Variogram du logiciel Sas.

Le variogramme est une fonction positive qui passe par l'origine. En général, le variogramme est une fonction croissante de h , et cette croissance est plus ou moins rapide selon les variables. Les valeurs d'un phénomène diffèrent statistiquement de plus en plus à mesure qu'augmente la distance entre les points considérés (Freycom and Sebastien, 1991).

Le comportement du variogramme à l'origine traduit la régularité de la variable régionalisée (Freycom and Sebastien, 1991). La plupart des variogrammes tracés à partir de phénomènes naturels possèdent une discontinuité à l'origine. Alors qu'à l'origine le variogramme est nul par construction, la limite à gauche du variogramme quand la distance tend vers 0 est appelée effet de pépite ou plus simplement pépite. De même qu'en géologie minière, cette discontinuité peut être due à la présence de pépites, variations très locales de la teneur d'un minerai, l'effet de pépite traduit la variabilité à des distances faibles et donc l'irrégularité des séries. Dans notre étude, comme les erreurs d'échantillonnage et de mesure sont non autocorrélées, leurs variances font partie de l'effet de pépite de la série observée.

Le krigeage est un interpolateur linéaire : chaque valeur prédite pour une balle sera une moyenne pondérée des valeurs mesurées sur cette balle et sur les balles voisines. L'objet de cette étude étant le calcul d'une interpolation à courte distance (*short range*), le variogramme a été étudié jusqu'à une distance de 20 balles ce qui correspond approximativement au contenu d'un camion en coton-graine.

Chaque valeur interpolée est assortie d'une erreur-type de prédiction : c'est la racine carrée de l'espérance du carré de l'écart entre valeur prédite et valeur vraie. L'interpolateur étant non biaisé, le carré du biais n'intervient pas dans cette espérance. Pour la validation croisée, nous avons confronté cette erreur-type annoncée à la racine carrée de la moyenne du carré de l'écart entre valeur interpolée et valeur observée.

Les études ont été menées à l'aide du logiciel Sas version 9.2, notamment les procédures *mixed*, *variogram* et *univariate* (SAS Institute Inc. 2010. SAS OnlineDoc® 9.2. Cary, NC: SAS Institute Inc), et avec la bibliothèque *gstat* du logiciel R (Pebesma, E.J., 2004. Multivariable geostatistics in R: the *gstat* package. Computers & Geosciences, 30: 683-691.).

V.2.3. Résultats et discussion

La correction des données des échantillons prélevés à partir de l'observation des standards n'a pas été possible. En effet, pour plusieurs variables, il n'existe aucune correspondance entre les écarts observés entre standards et les écarts observés entre les deux répétitions de mesures par échantillon au cours du même temps. Les Figure V-2 à Figure V-4 illustrent ces faits.

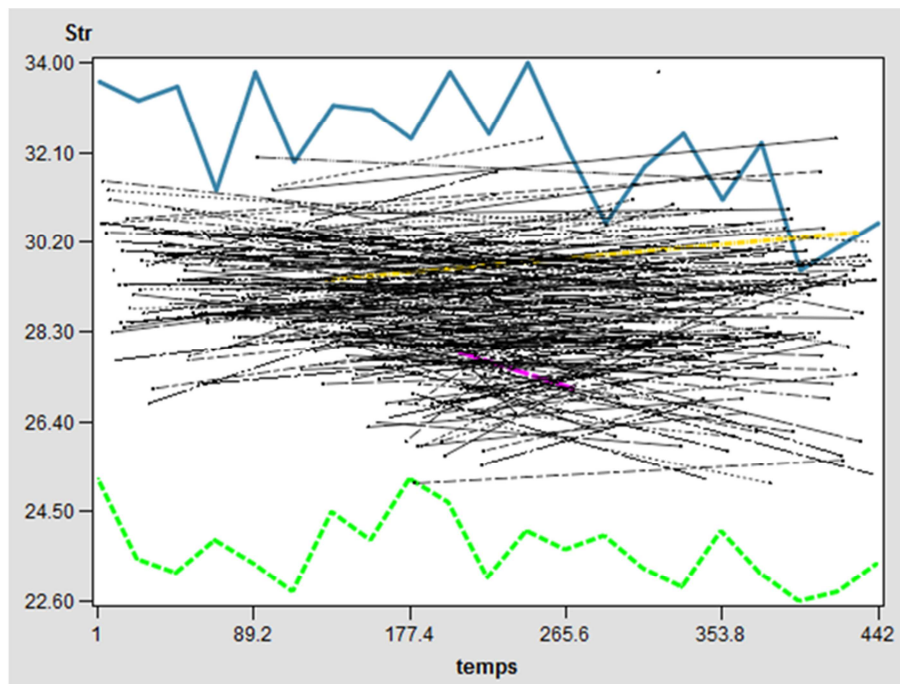


Figure V-2 : Str (g/tex) des matières de références et des deux répétitions de mesures par échantillon dans la situation C4G1, saison 1. Evolutions comparées des mesures obtenues sur les standards (LS en traits pleins épais, SW en pointillé épais) et sur les échantillons analysés. On ne note pas de parallélisme entre ces évolutions sur les trois figures de ce type.

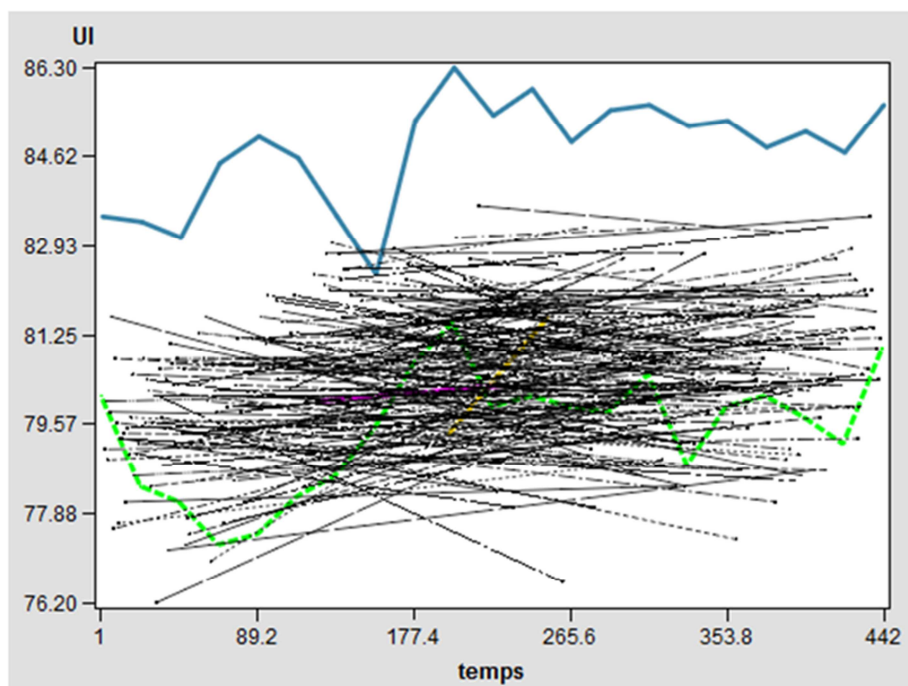


Figure V-3 : UI des matières de références et des deux répétitions de mesures par échantillon dans la situation C2G3, saison 1.

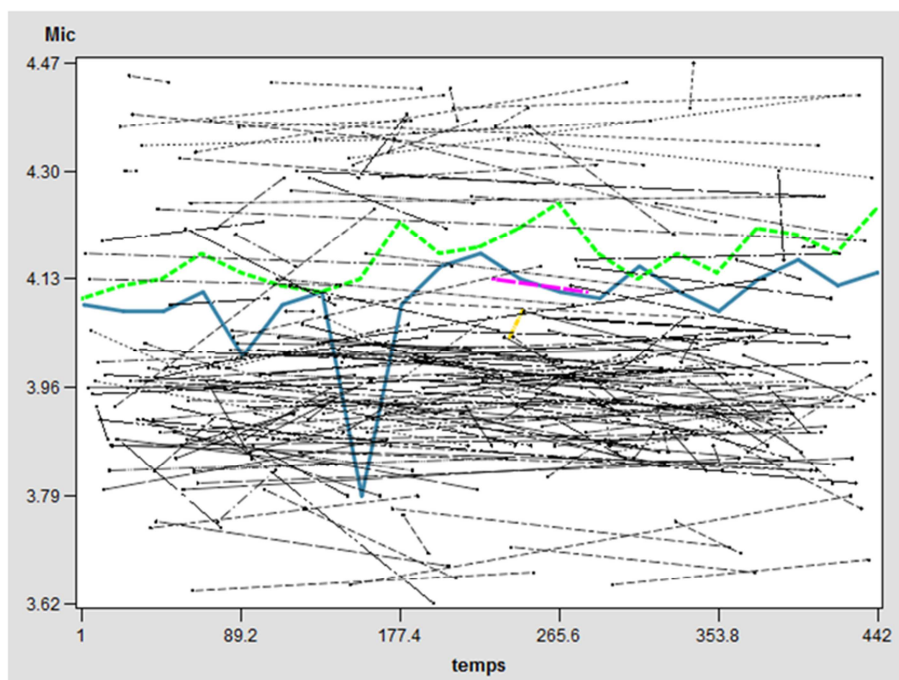


Figure V-4 : Mic des matières de références et des deux répétitions de mesures par échantillon dans la situation C2G3, saison 1.

Une dérive a bien été constatée entre les standards, mais nous n'avons généralement pas pu la relier aux différences entre les deux répétitions. De plus, en dehors de la longueur et de la ténacité pour lesquelles les témoins sont contrastés, les valeurs observées sur les échantillons ne sont pas toujours encadrées par celles des témoins ; pour une correction par régression nous nous trouverions souvent en situation d'extrapolation. En définitive, nous n'avons pas fait de correction des résultats.

Nous avons donc effectué nos travaux avec les valeurs brutes des caractéristiques technologiques des échantillons collectés. Nous avons représenté les graphes des séries brutes et les variogrammes par usine pour chacune des caractéristiques technologiques ou variable.

Montrons que les caractéristiques technologiques mesurées sur des balles successives forment des séries assez lisses (régulières) pour se prêter à l'interpolation. Pour cela examinons deux graphes de mesures brutes (une régulière en Figure V-5 et une moins régulière en Figure V-7) ainsi que les variogrammes correspondants. Pour les mesures brutes, l'indicateur des balles est donné en abscisses et les valeurs des caractéristiques technologiques en ordonnées. Pour les variogrammes, nous avons en abscisses l'indicateur de la distance qui sépare les balles et en ordonnées les valeurs des semi-variances (Figure V-6 et Figure V-8).

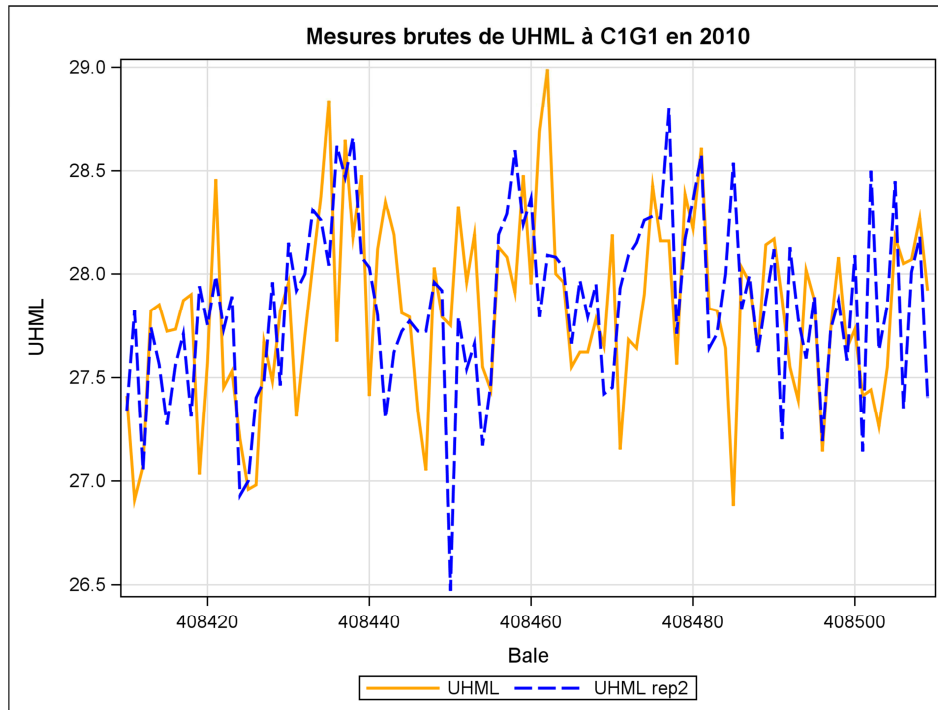


Figure V-5 : Résultats des deux répétitions de mesure des longueurs UHML (mm) des 100 balles consécutives prélevées en saison 2 pour la situation C1G1 : série régulière de données.

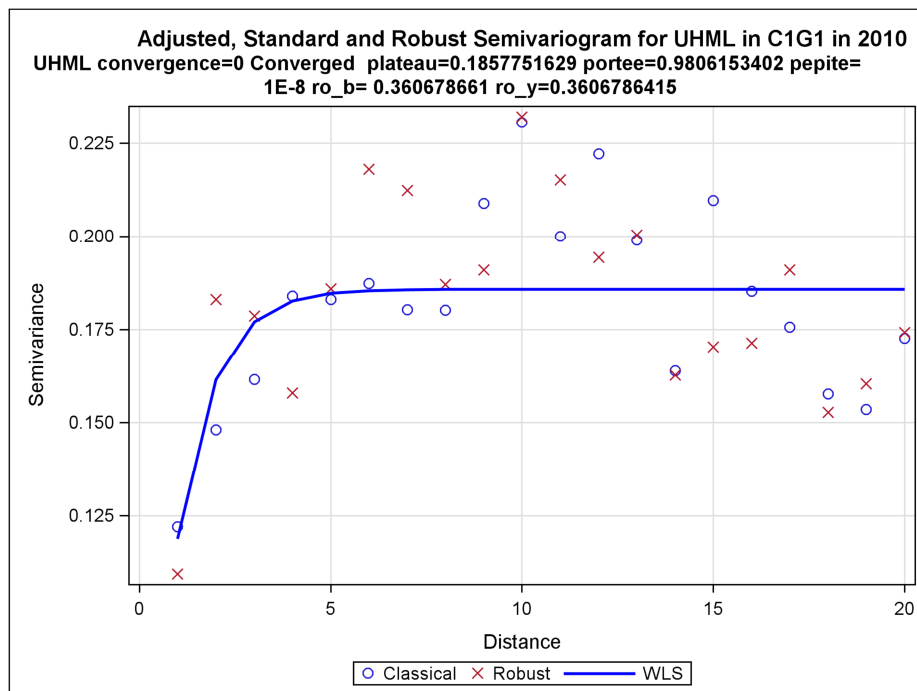


Figure V-6 : Semi-variogramme de l'UHML des échantillons des 100 balles consécutives prélevées en saison 2 de la situation C1G1.

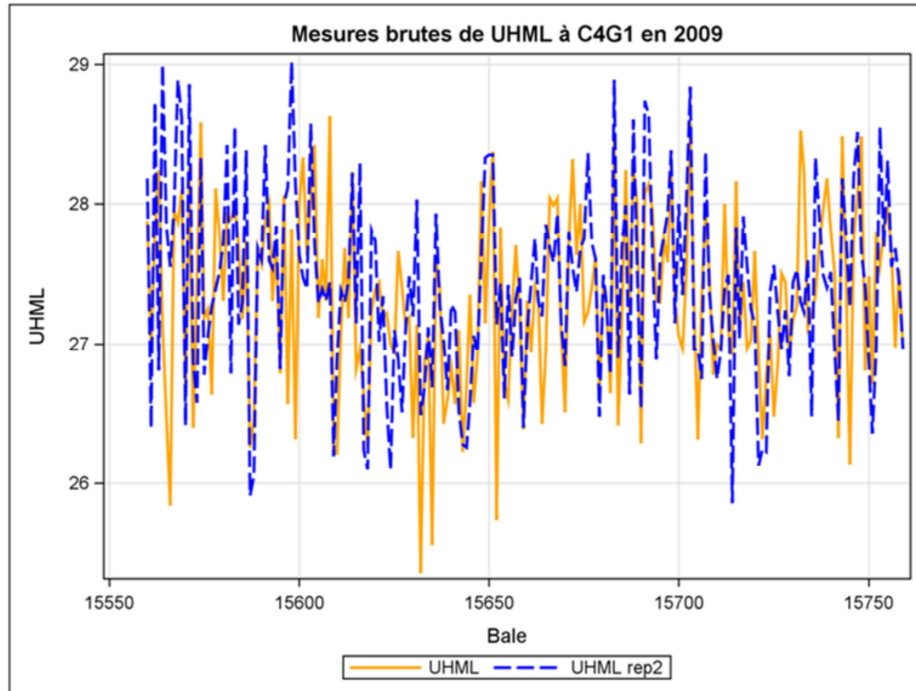


Figure V-7 : Résultats des deux répétitions de mesure des uniformités UHML des 200 balles consécutives prélevées en saison 1 pour la situation C4G1 : série moins régulière.

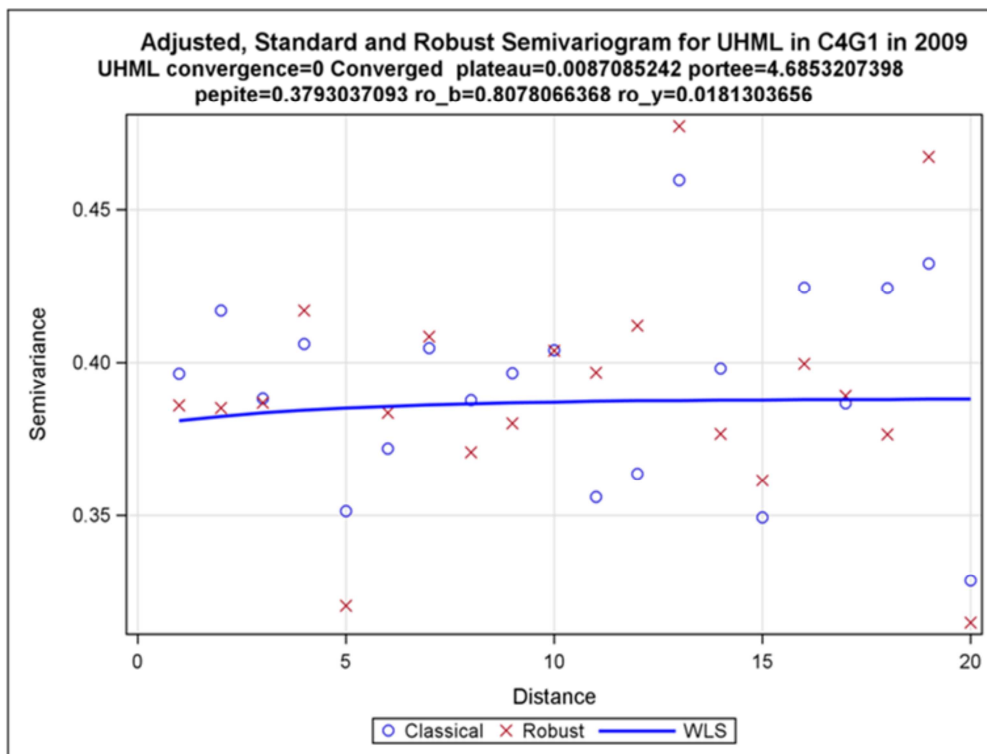


Figure V-8 : Semi-variogramme de UHML des échantillons des 200 balles consécutives prélevées en saison 1 de la situation C4G1.

Sur les graphes des mesures brutes, le trait plein représente les résultats de la première répétition de mesure (rep1) et en trait discontinu la deuxième répétition de mesure (rep2). Ces graphiques montrent des séries régulières, cependant la première série (Figure V-5) est plus régulière que la seconde (Figure V-7).

Les deux variogrammes robustes montrent des courbes croissantes. La valeur de variance atteinte à une distance de 20 balles et l'ordonnée à l'origine (pépité) est nettement plus grand pour le deuxième variogramme (variance à 20 balles=0.37, effet de pépité=1.54) que pour le premier (variance à 20 balles =0.186, effet de pépité=1^{E-8}). Le variogramme permet donc de quantifier l'impression subjective du caractère lisse ou non d'une série.

Aux variations près de pentes et d'ordonnées à l'origine, on peut attribuer la même forme exponentielle à ces variogrammes. La covariance entre observations décroît alors exponentiellement avec la distance qui les sépare :

$$\text{Cov}(U_{(x)}, U_{(x+h)}) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{h}{\theta}\right)$$

Où σ^2 représente le plateau et θ représente la portée. A distance 0, la covariance est égale au plateau σ^2 . A distance ∞ , la covariance est nulle.

Nous avons recensé toutes les valeurs des effets pépité (voir Annexe 2) et en avons représenté les valeurs de pépites en ordonnées dans les boxplots par caractéristique technologique par saison d'échantillonnage (année en abscisse, Figure V-9).

Les boxplots de l'effet de pépité par saison d'échantillonnage et par variable permettent de visualiser sa distribution de l'effet de pépité sur l'ensemble des situations. On remarque que l'effet de pépité est en moyenne plus élevé en année 2009 qu'en année 2010 pour les variables Str, Rd, Xb, et légèrement plus élevé en 2009 qu'en 2010 pour le micronaire (IM). En revanche, il est plus faible en 2009 qu'en 2010 pour les variables de longueur (UHML et UI). Rappelons que l'effet de pépité traduit la régularité de la variable : plus sa valeur est élevée, moins la série de données est régulière. Or, l'échantillonnage de 2009 s'est effectué en fin de campagne cotonnière alors que celui de 2010 s'est effectué en pleine campagne cotonnière. Nous pouvons alors déduire les tendances suivantes :

- que les séries d'échantillons prélevés en 2009 sont sensiblement plus hétérogènes qu'en 2010 pour les variables Str, Rd, Xb, et légèrement plus hétérogènes pour la variable IM. Nous rappelons que les balles sur lesquelles les échantillons de 2009 sont prélevés proviennent de coton-graine hétérogène récupéré de petits lots des magasins et des marchés de coton-graine.

- que les variables de longueur (UHML et UI) ont été peu influencées par la période de l'échantillonnage au cours de la saison d'égrenage ; il semble au contraire qu'elles soient plus régulières vers la fin de la campagne.

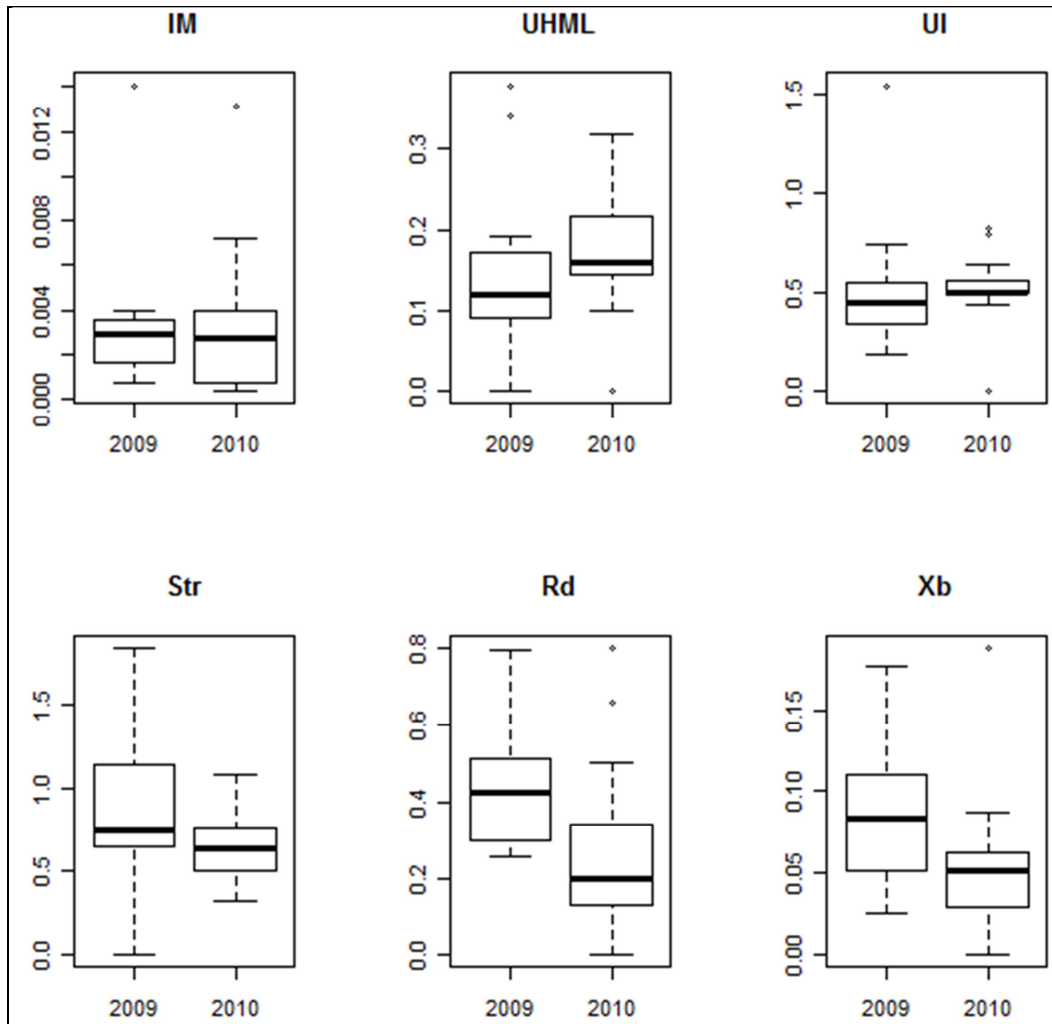


Figure V-9 : Effet de pepsine estimée sur chaque caractéristique technologique : distributions en 2009 et 2010.

Pour valider l'interpolation inter balles, nous ne disposons pas de la vraie valeur de la balle U_i mais de résultats de deux répétitions comme substituts de la vraie valeur de la balle. Les valeurs des deux répétitions sont entachées de la même erreur d'échantillonnage, seule l'erreur de mesure est indépendante. Donc pour montrer plus concrètement l'intérêt de l'interpolation, nous avons besoin d'effectuer une validation croisée sur un autre échantillon indépendant dans la même balle ; cette étude est le thème du prochain paragraphe.

V.3. Amélioration de la précision de mesure d'une balle par la méthode de krigeage

Pour tester les possibilités d'interpolation observées par l'étude la variabilité inter balles des prélèvements des 200 balles consécutives de la première saison, nous avons décidé de faire une expérimentation supplémentaire au cours de la deuxième saison d'égrenage. Ainsi pour permettre d'effectuer une validation croisée, nous avons décidé de prélever deux échantillons par balle (un en haut et un en bas de la balle) sur des séries de 20 balles consécutives, et d'interpoler la moyenne des deux répétitions du bas d'une balle de manière à valider la valeur interpolée en la comparant à la moyenne des deux répétitions du haut de la même balle.

V.3.1. Expérimentation: échantillonnage et mesure sur CMI

L'échantillonnage a été réalisé durant la deuxième saison d'égrenage 2009-2010 dans cinq pays de l'Afrique de l'Ouest et du Centre. Dans chaque pays, une usine a été choisie au hasard et, durant toute la saison d'égrenage, des prélèvements hebdomadaires sur des trains de 20 balles consécutives au cours d'une journée de production ont été effectués. Sur chaque balle un échantillon est prélevé en bas, avec le sabot habituellement utilisé pour échantillonner, et un autre échantillon est prélevé en haut par grattage de la balle pressée et non encore emballée (Figure V-10).

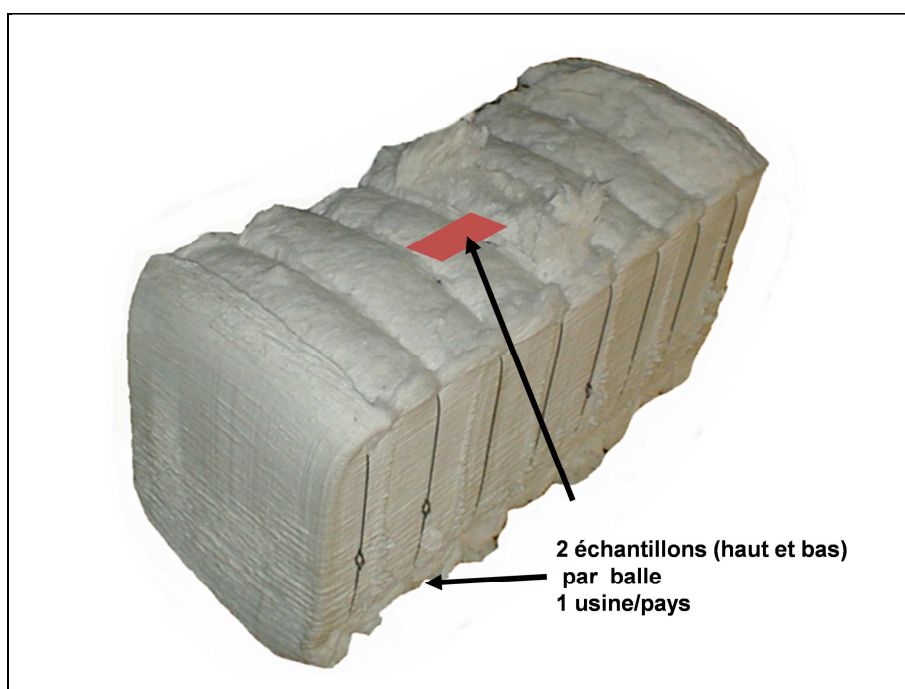


Figure V-10 : Modalités d'échantillonnage des balles dans l'expérimentation de validation de l'interpolation des valeurs des balles.

Au total nous avons prélevé 3246 échantillons (Tableau V-II) et de 817 balles sélectionnées dans cinq usines d'égrenage (Tableau V-III). Nous rappelons également que pour des raisons de confidentialité, les pays et les usines retenus ont été codées.

Tous les échantillons de l'étude sont apportés au même laboratoire et analysés usine par usine à l'aide d'une machine HVI modèle 1000. Au sein de chaque usine, chaque échantillon est analysé deux fois, et les deux répétitions sont organisées en deux blocs complets randomisés de 20 balles prélevées par semaine. Une première répétition est menée sur les échantillons dans un ordre choisi au hasard; puis la deuxième répétition est menée sur les mêmes échantillons dans un autre ordre choisi au hasard. De cette manière, les autocorrélations qui affecteraient les éventuelles dérives d'étalonnage ne viennent pas se confondre avec celles que l'on étudie sur la série des balles successives.

Tableau V-II : Nombre d'échantillons prélevés en bas et en haut dans des balles successives durant 10 semaines successives au maximum dans les différentes situations étudiées en saison 2.

Situations et niveau de prélèvement	Semaines de production en saison 2 (du début à la fin de campagne d'égrenage pour chaque situation)										Total général
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
C1G3	80	80	76	80	80	80	80	79	80		715
Bas de balle	40	40	40	40	40	40	40	39	40		359
Haut de balle	40	40	36	40	40	40	40	40	40		356
C2G4	80	80	80	76	80	79	80	80		80	715
Bas de balle	40	40	40	40	40	39	40	40		40	359
Haut de balle	40	40	40	36	40	40	40	40		40	356
C4G2	80		80	79	77						316
Bas de balle	40		40	39	38						157
Haut de balle	40		40	40	39						159
C5G3	80	79	80	80	78	78	74	80	78		707
Bas de balle	40	40	40	40	38	38	38	40	38		352
Haut de balle	40	39	40	40	40	40	36	40	40		355
C6G2	80	80	78	80	78	80	80	80	79	78	793
Bas de balle	40	40	38	40	40	40	40	40	39	40	397
Haut de balle	40	40	40	40	38	40	40	40	40	38	396
Total général	400	319	394	395	393	317	314	319	237	158	3246

Tableau V-III : Nombre de balles successives échantillonnées durant 10 semaines successives au maximum dans les différentes situations étudiées en saison 2.

Situations	Semaines de production en saison 2										Total général
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
C1G3	20	20	19	20	20	20	20	20	20		179
C2G4	20	20	20	19	20	20	20	20		20	179
C4G2	20		20	20	20						80
C5G3	20	20	20	20	20	20	19	20	20		179
C6G2	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	200
Total général	100	80	99	99	100	80	79	80	60	40	817

V.3.2. Méthode statistique d'analyse des données

La méthode statistique d'analyse des données est le krigeage que nous avons développé dans le paragraphe précédent (§ V.2), cependant il y a quelques particularités à souligner ici. Dans un premier temps, nous allons montrer que le krigeage est utile et produit des interpolations dont la précision correspond à celle annoncée théoriquement. Nous l'avons fait en retrouvant par interpolation les valeurs ponctuelles mesurées en haut des balles de chaque série à partir de celles mesurées en bas des balles de la même série et en vérifiant si la précision obtenue correspond à la précision calculée par krigeage. Il s'agit de la méthode classique de la validation croisée.

Comment le vérifier ?

Pour valider cette prédiction en haut des balles, nous n'avons pas à notre disposition la vraie valeur technologique en ce point, mais une mesure moyenne de deux échantillons par balle entachée de deux erreurs : l'erreur de mesure et l'erreur d'échantillonnage. La différence entre prédiction et observation est la somme des deux erreurs indépendantes citées ci-dessus et de celle de la prédiction, leurs variances s'ajoutent donc. Avec deux répétitions par échantillon et un seul échantillon par couche, nous pouvons estimer la variance de l'erreur de mesure, mais pas celle de l'erreur d'échantillonnage. La variance de l'écart entre prédiction et mesure n'est donc pas seulement la variance de krigeage, il faut aussi lui ajouter la variance d'échantillonnage. Celle-ci fait intervenir la variance intra-couche que nous ne connaissons pas, car nous n'avons qu'un seul échantillon par couche. Cependant, nous avons à notre disposition des couples de mesures sur des couches très proches. Pour estimer la variance intra-couche, nous allons faire comme si les mesures effectuées en bas d'une balle et en haut de la suivante venaient de la même couche.

Plaçons nous maintenant conditionnellement au processus U , les variances dont il est question sont des variances d'erreur, erreur d'interpolation de U par \hat{U} , erreur de mesure de

U par Y. Ecrivons les équations qui permettent de préciser l'approximation que nous faisons :

- en haut d'une balle $Y(x) = U(x) + \varepsilon(x)$
- en bas de la balle suivante $Y(x + \delta x) = U(x + \delta x) + \varepsilon(x + \delta x)$ avec δ l'écart entre le haut d'une balle et le bas de la balle suivante.

Par définition $cov(\varepsilon(x), \varepsilon(x + \delta x)) = 0$.

Nous faisons l'approximation que $U(x) = U(x + \delta x)$ pour δ petit

Alors l'espérance de la différence entre le haut d'une balle et le bas de la balle suivante est : $E(Y(x) - Y(x + \delta x)) = 0$

La variance attendue de cette différence est l

$$\begin{aligned} var(Y(x) - Y(x + \delta x)) &= var(U(x) + \varepsilon(x) - U(x + \delta x) - \varepsilon(x + \delta x)) \\ &\equiv var(\varepsilon(x) - \varepsilon(x + \delta x)) \text{ en négligeant } U(x) - U(x + \delta x) \end{aligned}$$

Alors :

$$\begin{aligned} var(Y(x) - Y(x + \delta x)) &= var(\varepsilon(x)) + var(\varepsilon(x + \delta x)) - 2cov(\varepsilon(x), \varepsilon(x + \delta x)) \\ &= 2var(\varepsilon(x)) \text{ car les } \varepsilon(x) \text{ sont indépendants} \end{aligned}$$

Calculons la variance attendue de la différence entre mesure du haut et valeur de l'interpolation :

$$\begin{aligned} \text{soit } \hat{U} \text{ l'interpolateur, } var(Y(x) - \hat{U}(x)) &= var(Y(x)) + var(\hat{U}(x)) - 2cov(Y(x), \hat{U}(x)) \\ var(Y(x) - \hat{U}(x)) &= var(Y(x)) + var(\hat{U}(x)) \text{ puisque } cov(Y(x), \hat{U}(x)) = 0 \end{aligned}$$

En effet, comme l'interpolation U et la variable Y sont issues de deux jeux de données différents, les erreurs d'interpolation sur le premier et de mesure sur la seconde sont indépendantes. Alors :

$$var(Y(x) - \hat{U}(x)) = 1/2(var(Y(x) - Y(x + \delta x)) + var(\hat{U}(x)))$$

C'est de cette façon que nous avons calculé la variance attendue de la différence entre l'interpolation à partir des mesures effectuées en bas des balles et la mesure effectuée en haut des balles.

V.3.3. Résultats et discussion

V.3.3.1. Existence et intensité de l'autocorrélation

Sur l'ensemble des données observées, chaque variogramme a été croissant. Cela montre qu'il y a toujours eu une autocorrélation entre balles voisines, qui décroît avec la distance qui les sépare, et justifie que l'on puisse proposer le krigeage comme interpolateur. Le premier variogramme (Figure V-11) montre une forte autocorrélation, avec des écarts croissants avec la distance qui séparent les observations. En revanche le deuxième variogramme (Figure V-12) montre des écarts entre mesures voisines presque aussi importants que les écarts entre mesures plus distantes. C'est dans la première situation que les interpolations donneront les meilleurs résultats (Annexe 3).

La réflectance R_d mesurée à C1G3 (Figure V-11) montre une forte autocorrélation. A faible distance, l'écart quadratique moyen entre deux données est faible environ 0.2 (pepite) et cet écart augmente sensiblement avec la distance jusqu'à atteindre un maximum d'environ 1.2 quand h tend vers l'infini. Quand deux mesures sont très proches, on peut donc estimer leur covariance à $C(h) = C(0) - \gamma(h) = \gamma(\infty) - \gamma(0) = 1.2 - 0.2 = 1$, et leur corrélation à $1/1.2$ soit 0.8 environ. Quand deux mesures sont séparées d'une distance de 10 balles, le variogramme atteint 1.1, la covariance est alors $\gamma(\infty) - \gamma(10) = 1.2 - 1.1 = 0.1$. Au-delà d'une distance de 10 balles, la corrélation peut être considérée comme négligeable et les poids dans l'interpolation seront négligeables.

En revanche, la ténacité Str mesurée à C6G2 (Figure V-12) montre une faible autocorrélation. A faible distance, l'écart quadratique moyen entre deux données est d'environ 0.4 et le variogramme tend vers 0.9 quand la distance tend vers l'infini. L'autocorrélation à faible distance n'est donc plus que de $(\gamma(\infty) - \gamma(0)) / \gamma(\infty) = 0.55$.

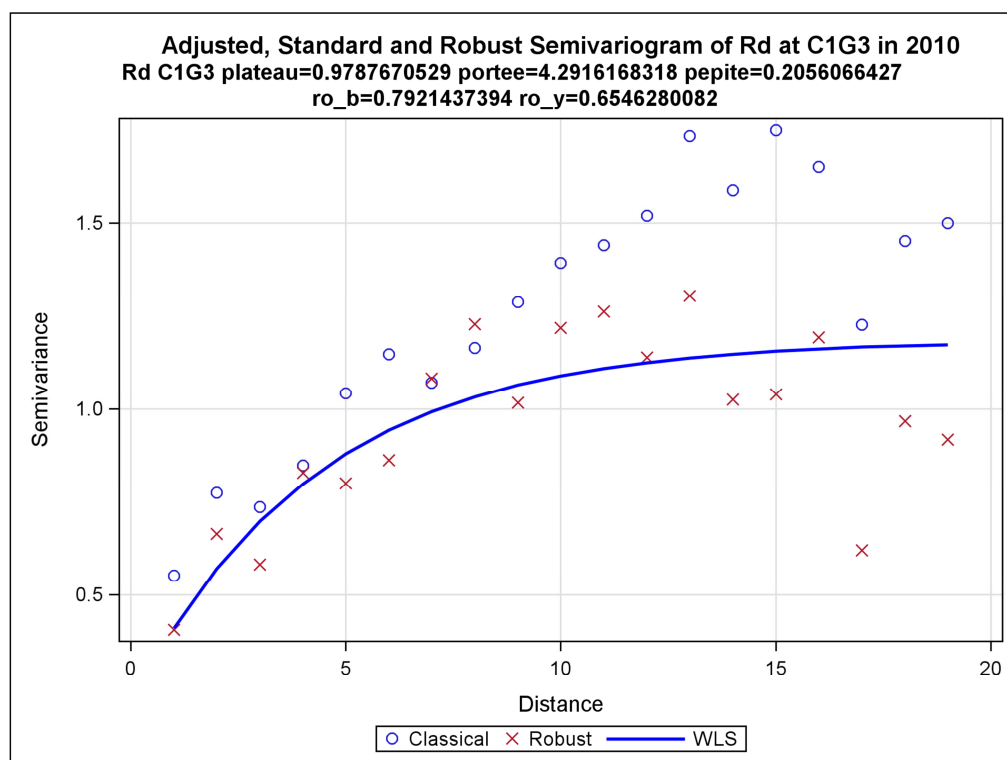


Figure V-11 : Variogramme de Rd dans la situation C1G3.

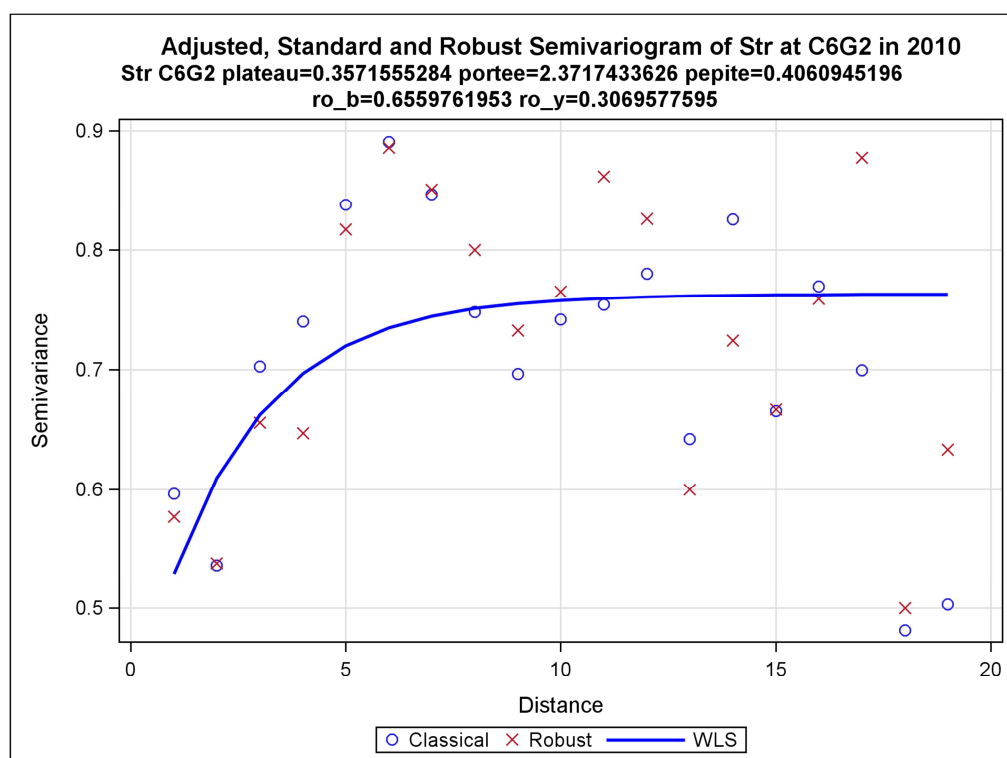


Figure V-12 : Variogramme de Str dans la situation C6G2.

V.3.3.2. Prédiction de la valeur d'un échantillon non observé de la balle à l'aide du krigeage ponctuel

Les résultats de l'interpolation ponctuelle sont présentés dans les Tableau V-IV a et b. La première colonne (*predicted*) montre les erreurs-types attendues (somme des erreurs de prédiction, d'échantillonnage et de mesure). Les colonnes suivantes sont les racines carrées des carrés moyens de l'écart entre la valeur mesurée en haut et la valeur prédite par krigeage (colonne 2 : *kriging*), par la valeur mesurée en bas de la même balle (colonne 3 *bottom same bale*) ou enfin par le bas de la balle suivante (colonne 4 *bottom next bale*).

Les deux premières colonnes permettent de comparer l'erreur-type calculée par krigeage avec la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne de prédiction calculée empiriquement. Il apparaît que l'erreur-type calculée par krigeage est proche de ou supérieure à l'erreur-type constatée empiriquement, sauf dans de rares cas.

Les trois dernières colonnes permettent de comparer les performances empiriques obtenues en prédisant la valeur du haut d'une balle soit par krigeage, soit par le bas de la même balle, soit par le bas de la balle suivante. Il ressort de l'examen des tableaux que l'interpolation par krigeage présente de meilleurs résultats presque partout sauf dans les cas de Rd et Xb dans la situation C1G3. On observe également que la prédiction par le bas de la balle suivante est toujours meilleure ou presque aussi bonne que par le bas de la même balle.

D'une manière générale l'interpolation par krigeage permet d'obtenir des prédictions dont la précision est conforme aux calculs effectués avec les données empiriques. On observe également que cette précision est meilleure que les prédictions faites par les mesures ponctuelles proches (bas de la même balle et haut de la balle suivante).

Toutefois notre étude a porté sur une campagne de récolte du coton et sur cinq situations, il serait donc utile de valider nos résultats sur d'autres campagnes et sur un nombre plus élevé de situations.

Tableau V-IV a : Résultats de l'interpolation ponctuelle.**Variable Mic**

	predicted	Kriging	bottom same bale	bottom next bale
	Sum	Sum	Sum	Sum
Code Usine				
C6G2	0.134	0.118	0.159	0.131
C2G4	0.117	0.088	0.140	0.081
C1G3	0.107	0.069	0.121	0.067
C5G3	0.084	0.076	0.110	0.072
C4G2	0.152	0.109	0.174	0.110

Variable UHML

	predicted	Kriging	bottom same bale	bottom next bale
	Sum	Sum	Sum	Sum
Code Usine				
C6G2	0.619	0.517	0.646	0.630
C2G4	0.483	0.474	0.553	0.521
C1G3	0.509	0.528	0.594	0.571
C5G3	0.839	0.462	0.570	0.568
C4G2	0.448	0.500	0.548	0.547

Variable UI

	predicted	Kriging	bottom same bale	bottom next bale
	Sum	Sum	Sum	Sum
Code Usine				
C6G2	0.976	0.999	1.121	1.170
C2G4	0.810	0.851	0.955	0.935
C1G3	0.851	0.892	1.001	1.007
C5G3	0.820	0.943	1.017	1.040
C4G2	0.823	0.859	0.886	0.867

Tableau V-IV b : Résultats de l'interpolation ponctuelle.

Variable Str

	predicted	Kriging	bottom same bale	bottom next bale
	Sum	Sum	Sum	Sum
Code Usine				
C6G2	1.135	0.931	1.202	1.154
C2G4	1.120	1.019	1.192	1.097
C1G3	0.994	0.792	1.003	0.984
C5G3	1.079	0.826	1.141	1.025
C4G2	0.956	0.995	1.116	1.074

Variable Rd

	predicted	Kriging	bottom same bale	bottom next bale
	Sum	Sum	Sum	Sum
Code Usine				
C6G2	2.773	2.762	3.618	3.444
C2G4	0.934	0.644	1.019	0.785
C1G3	0.963	0.541	1.057	0.449
C5G3	0.758	0.527	0.754	0.642
C4G2	0.902	0.784	1.138	0.842

Variable X_b

	predicted	Kriging	bottom same bale	bottom next bale
	Sum	Sum	Sum	Sum
Code Usine				
C6G2	2.403	2.515	3.311	3.074
C2G4	0.410	0.306	0.472	0.328
C1G3	0.802	0.424	0.452	0.357
C5G3	0.368	0.274	0.374	0.318
C4G2	0.468	0.373	0.540	0.397

V.4. Conclusion

En complément à l'étude de la variabilité intra-balle, nous avons étudié la variabilité inter balles afin d'améliorer la précision de mesure de la moyenne d'une balle de coton. Notre méthode d'analyse des données est basée sur l'hypothèse que « les variations des caractéristiques technologiques des fibres de coton des balles successives sont lisses ». Les données que nous avons collectées nous ont permis de vérifier cette hypothèse pour plusieurs séries de mesures. Nous avons mis à l'épreuve la technique d'interpolation par une validation croisée et les résultats ont montré que la méthode de krigeage s'adaptait à nos données et fournissait en conséquence de bonnes estimations. Nous avons pu en déduire une amélioration de la procédure d'échantillonnage préconisée dans le chapitre précédent. Ainsi, au lieu de prélever deux couches par balle et faire une répétition de mesures selon les types d'analyse (composite ou grappe), il suffit de prélever un seul échantillon par balle (bas de chaque balle) et faire une analyse selon le protocole donné en Chapitre IV.

Conclusions et perspectives

Conclusions et perspectives

Conclusion

L'objet de cette étude est d'estimer l'importance de la variabilité intra-balle des caractéristiques technologiques des fibres dans huit pays de l'Afrique de l'Ouest et du Centre (AOC) : Bénin, Burkina Faso, Cameroun, Côte d'Ivoire, Mali, Sénégal, Tchad et Togo. L'étude a porté sur les six caractéristiques technologiques de la fibre de coton recommandées par le groupe de travail ICAC intitulé *Commercial Standardization of Instrument Testing of Cotton* (ICAC-CSITC) : micronaire, longueur, uniformité de longueur, ténacité et couleur (réflectance et degré de jaune).

En pratique, l'estimation de la variabilité intra-balle de chacune de ces six caractéristiques technologiques dans les huit pays de l'AOC doit permettre d'établir 1) la méthodologie d'échantillonnage en indiquant le nombre de prélèvement(s) à effectuer sur la balle et à quel(s) endroit(s) de celle-ci ; 2) la procédure d'analyse des échantillons sur une chaîne de mesure instrumentale (CMI). Ces conditions doivent permettre de garantir le respect des tolérances de mesure des différentes caractéristiques telles qu'elles sont admises dans les échanges internationaux des balles de coton.

Pour parvenir à l'objectif visé, l'hypothèse émise est la suivante : la variabilité intra-balle est prévisible en fonction des conditions de production en Afrique de l'Ouest et du Centre et des équipements et conditions d'égrenage. Si la distribution observée des caractéristiques technologiques des fibres de coton prélevées à l'intérieur des balles suit une loi normale, vérifier cette hypothèse se résume à décomposer la variance intra-balle.

Pour vérifier cette hypothèse et atteindre les objectifs visés, la méthode de travail s'est déroulée en deux phases :

- Une première phase dite d'expérimentation a été réalisée par pays dans des usines représentatives choisies au hasard sur une liste exhaustive en tenant compte de leur bassin d'approvisionnement en coton graine et de leur équipement en matériel de nettoyage des fibres. Au total 1720 échantillons ont été prélevés au sein de 215 balles. Tous les échantillons collectés ont été caractérisés en Afrique dans un laboratoire contrôlé respectant les conditions standardisées d'environnement en accord avec les normes en vigueur, soit 65%+/- 2% d'humidité relative et 21°C +/- 1°C en température.

La chaîne de mesure intégrée (CMI) modèle Uster Technologies HVI1000 a servi pour caractériser les échantillons suivant la norme ASTM 5867 (ASTM, 2005) , une mesure du micronaire, deux mesures de longueur/ténacité et deux mesures de colorimétrie (réflectance et indice de jaune). Toutes les précautions nécessaires ont été prises pour éviter toute contamination ou, le cas échéant, en mesurer l'importance.

- Une deuxième phase consacrée à l'analyse des données collectées sur les échantillons prélevés s'est déroulée en France. A l'aide du logiciel Sas version 9.2 et du logiciel R, toutes les données ont été analysées suivant la méthode statistique des modèles linéaires mixtes. Grâce à une méthode particulière de décomposition des variances observées, les résultats nous permettent de proposer les deux modalités pratiques suivantes pour le classement commercial (Aboé, Gourlot et al., 2011) : 1) prélever deux échantillons par balle et 2) caractériser ces échantillons sur CMI avec une répétition d'une mesure d'un échantillon composite pour le micronaire, une répétition de deux mesures par échantillon pour la longueur/ténacité, et une répétition de deux mesures d'un échantillon composite pour la couleur.

Nous avons comparé les procédures d'échantillonnage et d'analyse sur CMI proposées à l'AOC à celles des USA publiées en 2001. Ainsi, suivant les résultats que nous avons présentés dans cette étude, à l'échelle intra-balle, les fibres seraient de caractéristiques technologiques plus homogènes en AOC qu'aux USA pour la colorimétrie et moins homogènes pour la longueur et la ténacité. Quant au micronaire, l'homogénéité est similaire.

En supplément à l'étude portant sur la variabilité intra-balle, nous avons abordé les premières étapes de l'étude de la variabilité inter-balles pour améliorer la précision de mesure de la moyenne des caractéristiques technologiques des balles individuelles. L'évolution de la variabilité de ces caractéristiques a été analysée en fonction des distances qui séparent les balles les unes des autres lors de leur production. Cela s'est fait au travers de la vérification de deux hypothèses.

Première hypothèse : Les variations entre balles successives sont suffisamment lisses pour que la précision des caractéristiques technologiques de chaque balle puisse être améliorée par interpolation. En réalité, nous avons affaire à une production plus ou moins homogène et qui se mélange sur le marché de coton-graine et au cours de l'égrenage ; il n'y a donc pas d'indépendance entre les mesures successives dans le flot de coton fibre qui sort de l'usine. C'est cette autocorrélation entre mesures successives que nous voudrions vérifier et mettre à profit pour l'interpolation.

Deuxième hypothèse : Le doublement du nombre de sabots (un sabot prélève un échantillon sur une face de la balle de coton) par balle peut être évité en remplaçant le sabot supérieur d'une balle par le sabot inférieur de la balle suivante.

La méthode de travail s'est donc déroulée également en deux phases, une première phase d'expérimentation en Afrique et une deuxième phase d'analyse des données en France.

Expérimentation :

- Pour vérifier la première hypothèse de cette étude sur la variabilité inter balles, nous avons réalisé une expérimentation sur deux saisons de production 2008-2009 (saison 1) et 2009-2010 (saison 2). Les usines échantillonnées sont celles qui ont été choisies pour l'estimation de la variance intra-balle. Les échantillons ont été prélevés au cours de la même journée de production et chaque échantillonnage consiste à prélever un échantillon par balle sur 200 balles consécutives dans une usine au cours de la première saison et sur 100 balles consécutives pendant la deuxième saison. Pour l'ensemble des huit pays, nous avons échantillonné 4286 balles, et tous les échantillons ont été caractérisés dans un laboratoire contrôlé dans les mêmes conditions que les échantillons qui ont servi à l'estimation de la variance intra-balle.
- Pour vérifier la deuxième hypothèse, l'expérimentation s'est déroulée pendant la deuxième saison de production (2009-2010). Cinq pays de l'AOC ont été retenus et une usine a été choisie au hasard dans chaque pays. Des prélèvements de deux échantillons par balle (un en haut et un en bas) sur chacune des balles dans des trains de vingt balles consécutives ont été effectués toutes les semaines de la campagne de production. Au total 3246 échantillons ont été prélevés sur 817 balles et testés sur CMI dans les mêmes conditions que précédemment.

L'analyse des données a été réalisée suivant la méthode du krigeage en géostatistique à l'aide des logiciels Sas et R. Sur la base de ces deux phases d'échantillonnage et en utilisant cette méthode de krigeage, nous avons montré qu'une autocorrélation existe entre les mesures successives réalisées sur des balles consécutives. L'existence de cette autocorrélation autorise l'utilisation d'interpolations, en particulier celle par krigeage qui permet d'obtenir de très bonnes précisions de prédiction des valeurs moyennes des balles pour les six caractéristiques. Une méthode alternative utilisant les valeurs de deux balles consécutives assignées à la première balle fonctionne également avec suffisamment de précision. Cette étude supplémentaire nous permet d'apporter une amélioration à notre procédure d'échantillonnage et d'analyse proposée selon la première expérimentation pour les pays producteurs de coton de l'Afrique de l'Ouest et du Centre. Toutefois, nous ne

conseillons pas d'intégrer cette amélioration dans notre proposition initiale (Aboé, Gourlot et al., 2011), parce que l'étude de la variabilité inter balles n'a porté que sur une campagne de récolte du coton et que sur cinq situations ; il serait donc utile de valider nos résultats par d'autres études avant de les mettre en application.

Avec les résultats de ce travail de recherche, les pays producteurs de coton de l'Afrique de l'Ouest et du Centre peuvent amorcer le classement instrumental et vendre leurs fibres sur le marché du coton avec les six critères technologiques d'appréciation de la qualité des fibres recommandés par le CSITC.

Perspectives

Compte tenu de l'originalité de cette étude, elle présente des portées et ouvre des pistes et des perspectives intéressantes dans deux grandes directions : la recherche et l'application des résultats de recherche. Les objectifs seraient de comprendre et d'expliquer les facteurs d'amélioration de la qualité des fibres de coton produites en Afrique en relation avec leurs caractérisations d'une part, et de mettre les solutions proposées en œuvre afin d'améliorer globalement la qualité des fibres produites en Afrique d'autre part. Cela devrait conduire à une reconnaissance pleine et entière de la qualité des fibres produites en Afrique sur la base de mesures instrumentales.

En recherche, les thèmes suivants pourraient être étudiés pour parfaire nos connaissances :

Des études sur la variabilité intra-couche peuvent être envisagées pour apprécier la précision de la prise d'échantillon dans la nappe de couche pour vérifier que l'hypothèse au Chapitre IV est avérée. Cette étape pourrait inclure l'analyse des causes de la variabilité intra-balle, ce qui permettrait de les réduire ou de les éliminer dans la mise en application des résultats de cette recherche.

Il serait également utile de valider les résultats obtenus sur la variabilité inter balle sur d'autres saisons de production et dans d'autres situations. En particulier, des études de variabilité inter balles doivent être approfondies pour permettre de prédire la moyenne de la balle dans son ensemble sur la base de la première tentative mentionnée au Chapitre V de ce document.

Pour une meilleure appréciation des mesures sur CMI en AOC, une étude sur les fluctuations de température et d'humidité au cours de la journée et de leurs impacts sur nos

prédictions et estimations des mesures sur des balles serait intéressante et permettrait de limiter leurs effets sur les mesures et sur le risque de litige commercial qui y est lié.

Des études sur la reproductibilité peuvent être envisagées pour estimer la différence de niveaux de lecture qui peut être observée entre laboratoires. Les vérifications de la qualité des mesures faites au classement sont souvent conduites par des contrôleurs indépendants ou par les filateurs à l'arrivée des balles dans leurs entreprises. Les efforts de normalisation internationale, en particulier ceux entamés par le groupe de travail ICAC-CSITC, contribuent à rendre les résultats comparables dans le monde.

Enfin, les balles de coton sont vendues en lots de plusieurs dizaines de balles. Il faudrait élargir les connaissances existantes sur l'intra-balle et l'inter-balle à l'intra-lot et l'inter-lot qui intéressent les transitaires, négociants et finalement les filateurs qui sont les clients finaux des fibres de coton, en particulier celles produites en Afrique de l'Ouest et du Centre.

Dans l'application des résultats de recherche, nous envisageons les thèmes suivants :

Dans l'immédiat, les procédures d'échantillonnage et d'analyse qui sont proposées suite à l'estimation de la variance intra-balle doivent être mises en application dans certaines usines en vue de leur validation. Nous avons en effet indiqué que les niveaux de variance observés peuvent évoluer d'une saison à une autre, et qu'il est nécessaire que les compagnies cotonnières s'assurent régulièrement que les résultats qu'elles fournissent à leurs clients sont fiables au degré attendu.

Nos préconisations de procédures d'échantillonnage et d'analyse ont porté sur l'ensemble des huit pays. Nous avons pu observer que certaines situations de la première expérimentation s'éloignaient trop de l'origine des graphes Sigma A vs Sigma E pour qu'un protocole spécifique d'échantillonnage et de test ne leur soit applicable ; nous avons alors émis l'hypothèse d'un problème de trop grande hétérogénéité de qualité du coton-graine à l'entrée de l'usine d'égrenage. Pour mieux comprendre les raisons de ces résultats, il serait souhaitable de faire des études spécifiques de ces cas en vue d'en déduire des organisations pratiques garantes de l'homogénéité intra-balle des caractéristiques technologiques. Cela permettrait d'apporter des conseils à ces usines.

Enfin, nous pensons qu'une étude sur l'impact économique et financier est nécessaire pour justifier la mise en application du classement instrumental en Afrique de l'Ouest et du Centre.

Bibliographie

Bibliographie

Aboé, M., J.-P. Gurlot, E. Gozé, P. Hublé and A. Sinoiméri (2011). New findings on within bale repeatability of standardized instruments for testing cotton measurements on cotton fiber produced in West and Central Africa. *Textile Research Journal* (Sous presse): 42 p.

AFCOT (2011). *Règlement Général Européen*. 51p.

Amadou, S. A. (2006). *Standards Afrique de qualité du coton fibre, guide technique N°3*. Version 1: 39 p.

Amadou, S. A. (2010). *Veille qualité et classement du coton*. Parakou, Benin, Document interne: 13 p.

Anthony, W. S., W. R. J. Meredith and J. R. Williford (1988). Neps in ginned lint: the effects of varieties, harvesting, and ginning practices. *Textile Research Journal* 58(11): 633-640.

ASTM (2005). *Standard test methods for measurement of physical properties of cotton fibers by High Volume Instruments*. Annual Book of ASTM Standards. A. S. f. T. a. Materials. Philadelphia, PA (USA). D5867 7.02: 886-893.

Baker, K. D., E. Hughs and J. Foulk (2010). Cotton quality as affected by changes in spindle speed. *Applied Engineering in Agriculture* 26(3): 363-369.

Bargerion, J. D. (1996). *HVI measurements : length and short fiber*. Engineered Fiber Selection System, Raleigh (NC), USA.

Bargerion, J. D. and P. E. Sasser (1993). *Cotton short fiber from fibrogram and regression analysis*. Beltwide Cotton Conferences, New Orleans, Florida, National Cotton Council of America.

Beasley, C. A. (1975). Developmental morphology of cotton flowers and seed as seen with the scanning electron microscope. *American Journal of Botany* 62(6): 584-592.

Béroud, F., C. Ayena and A. Hougni (2001). *Étude du mécanisme de production et de distribution des semences coton au Bénin*. Rapport de mission, Dagrís.

Boulanger, J. and J. Gutknecht (1955). Influences variétales et climatiques sur le rythme de floraison du cotonnier (*G. hirsutum*). Coton et Fibres Tropicales 10(1): 26-34.

Bourelly, J. (1980). Contribution à l'étude des sucres du cotonnier. Coton et fibres tropicales XXXV(2): 189-207.

Braud, M. and F. Richez (1963). L'importance de la date de semis pour la culture cotonnière de l'Ouest et du Nord de la Centrefrique. Coton et fibres Tropicales 18(3): 265-272.

Buffet, M. (1979). La graine du cotonnier, sources importante de matières grasses et de protéines utilisables dans l'alimentation de l'homme et des animaux. Coton et Fibres Tropicales 34(2): 191-204.

Cauquil, J. and M. Vaissayre (1971). La "maladie bleue" du cotonnier en Afrique : transmission de cotonnier à cotonnier par *Aphis gossypii* Glover. Coton et Fibres Tropicales 26(4): 463-466.

Clouvel, P., B. Bachelier, T.-V. Cao, C. Klassou, A. A. Moussa and F. Thorrr (2003). Contribution à l'étude des déterminants de la qualité de la fibre de coton au Cameroun. [Cd-Rom]. Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque, Garoua, Cameroun,. - Montpellier : CIRAD, 2003.

Cressie, N. (1993). Statistics for Spatial Data, New York: Wiley.

Crétenet, M. and D. Dessauw (2006). Production de coton-graine de qualité. Version 1: 75 p.

Davidonis, G. H., A. S. Johnson, C. H. Campbell and J. A. Landivar (2000). Fiber property variability in green lint cotton at seed and boll level. Proceedings / 1(1): 592-593.

Davidonis, G. H., A. S. Johnson and R. M. Johnson (2004). Quantification of Within-Plant and Within-Field Yield and Fiber Variability. Crop management.

Deguine, J.-P. (1995). Etude bioécologique et épidémiologique du puceron *Aphis gossypii* Glover, 1877 (Hemiptéra, Aphididae) sur cotonnier en Afrique Centrale. Vers une évolution de la protection phytosanitaire. Sciences agronomiques. Montpellier (FR), Ecole Nationale Supérieure Agronomique: 138.

Delattre, R. (1973). Parasites et maladies en culture cotonnière. Montpellier.

Desplans, J. (1996). Etude histologique des Seed Coat Fragments et de la chalaze des graines de dix variétés de coton (*Gossypium hirsutum* L.). Cirad - Biotrop. Montpellier (FRA): 34 p.

Drieling, A. and J.-P. Gourlot (2008). Le test inter-laboratoires CSITC : Objectifs, modalités et résultats pour les laboratoires Séminaire inaugural du Centre Technique Régional d'Afrique de l'Ouest et du Centre. Bamako: 34 p.

Farr, W. K. (1931). Cotton fibers. I. Origin and early stages of elongation. Contributions from Boyce Thompson Institute 3: 441-458.

Fok, M. (1993). Le développement du coton au Mali par analyse des contradictions, les acteurs et les crises de 1895-1993. Document CIRAD, Département des Cultures annuelles, n°8: 213 p. + annexes.

Fok, M. and S. Tazi (2003). Évolution institutionnelle, approche statistique et dynamique de la performance en relation avec les objectifs de développement.

Freycom, V. and B. Sebastien (1991). La théorie des variables régionalisées. Séminaire 46p.

Fritz, A. and M. Vallerie (1971). Contribution à l'étude des déficiences minérales des sols sous culture cotonnière au Nord-Cameroun. Coton et fibres Tropicales 26(3): 273-301.

Gautier, J. (1947). Essais d'extraction d'huile de coton au Tchad. Coton et fibres Tropicales 2(3): 90-96.

Gautier, J. (1947). Les sous produits du coton : les linters. Coton et fibres Tropicales 2(1): 34-35.

Gourlot, J.-P. (1999). Recherche et développement en technologie : mesurer et améliorer la qualité des produits du cotonnier, créer de nouveaux débouchés. A. e. développement. Montpellier, Cirad. 22, Juin 1999: 90-113.

Gourlot, J.-P. (2002). Effets des caractéristiques de fibres de coton sur la mesure de leur résistance de rupture. Contribution à l'étude de la qualité des mesures réalisées sur un instrument intégré de mesure High Volume Instrument (HVI). Rapport de thèse. 1: 249 p.

Gourlot, J.-P., G. Gawrysiak and B. Bachelier (2006). Classement de la fibre de coton, Guide technique n°4. Version 1: 51 p.

Gutknecht, J. (1960). L'égrenage du coton aux Etats Unis. Coton et fibres Tropicales 15(1): 81-130.

Gutknecht, J. (1977). Etude préliminaire de l'influence de l'égreneuse à rouleau de laboratoire sur le pourcentage à l'égrenage et la longueur de la fibre. *Coton et fibres Tropicales* 32(3): 279-284.

Hertel, K. L. (1940). A method of fibre-length analysis using the fibrograph. *Textile Research Journal* 10/1940 10(12): 510-525.

Hertel, K. L. and R. Lawson (1964). Factors affecting fiber length-scanning measurement. *Textile Research Journal*: 866-879.

ICAC-CSITC. (2010). "Commercial Standardization of Instrument Testing of Cotton ", from www.csitc.org.

ICAC-Secretariat (2011). Instrument Testing of Cotton at the Producer Level for trading purposes. Washington D.C., USA.

ICAC (1994). L'égrenage du coton : de nouvelles techniques s'imposent. ICAC Recorder. I. C. A. Committee. Washington DC (USA), ICAC: 21-24.

ICAC (2010). Cotton World Statistics: Bulletin of the International Cotton Advisory Committee 295 p.

Jacquemart, J.-A. (1953). Contribution à l'étude de la structure du coton. *Coton et Fibres Tropicales* 8(2): 161-168.

Joshi, P. C., A. M. Wadhwani and B. M. Johri (1967). Morphological and embryological studies of *Gossypium* L. *Indian Journal of Agricultural Research* 33(B): 37-93.

Knowlton, J. (2005). International developments in cotton classification. Beltwide Cotton Conferences, New Orleans, USA, National Cotton Council of America.

Krifa, M. (2001). Etude des fragments de coque de graines de coton : détection, caractérisation, interaction avec les processus de filature et influence sur la qualité du fil. Laboratoire de Physique et Mécaniques Textiles de l'ENSITM. Mulhouse, Haute Alsace: 266 p.

Krowicki, R., S. and K. Duckett, E. (1996). Another look at the micronaire measurement of cotton. 9th Engineered Fiber Selection System, Raleigh (NC), USA.

Lagière, R. (1966). *Le Cotonnier*. Paris.

Levrat, R. (2010). La culture du coton dans la zone franc. Paris, France.

Lord, E. (1955). Air flow through plugs of textile fibres Part I : General flow relations. Journal of the Textile Institute 46(3): 191-213.

Lord, E. (1956). Air flow through plugs of textile fibres Part II : The micronaire test for cotton. Journal of the Textile Institute 47: 17-47.

Lord, E. (1956). Air flow through plugs of textile fibres Part III : The causticaire test for cotton. Journal of the Textile Institute 47: 635-649.

Lord, E. (1956). Relations between different measures of maturity and fineness of cotton. JOURNAL OF THE TEXTILE INSTITUTE 47: 209-221.

Lord, E. and S. Heap, A. (1988). The origin and assesement of cotton fibre maturity, International Institute for Cotton.

Mangialardi, G. J. and W. S. Anthony (1999). Evaluation of a mill-type lint cleaner. The Cotton Gin and Oil Mill Press(September 99): 6-10.

Marquié, C. (1996). Mise au point et étude de films biodégradables réalisés avec des farines de graines de cotonniers. Biochimie et Technologies Alimentaires. Montpellier (FR), Université de Montpellier: 193 p.

Mergeai, G., J.-M. Noel, J. Louwagie and J. Baudoin (1993). Utilisation du cotonnier sauvage *Gossypium areysianum* pour l'amélioration de l'espèce cultivée *G. hirsutum* L. Description de deux nouvelles lignées d'addition monosomiques. Coton et Fibres Tropicales 48(4): 231-251.

Meyer, V. G. and J. R. Meyer (1970). Some sources of variability in boll and fiber properties of cotton (*Gossypium hirsutum* L.).

Morton, W. E. and J. W. S. Hearle (1975). Physical properties of textile fibres. London, The Textile Institute and Heinemann.

Palmer, A. W. (1960). The Growth of Cotton Fiber Science in the United States. Annual Report Smithsonian Institution: 47-513.

Parry, G. (1982). Le cotonnier et ses produits : origine et constitution. Paris (V).

Perret, C. (2009). Cahier de l'Afrique de l'Ouest, Atlas régional de l'Afrique de l'Ouest. L. Bossard, OCDE: 295 p.

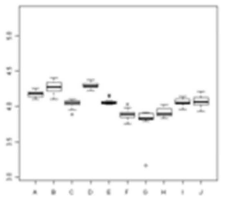
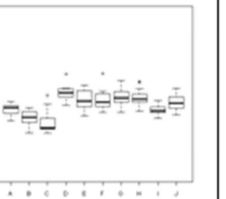
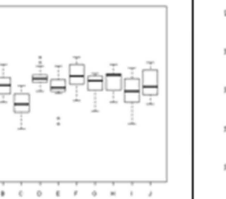
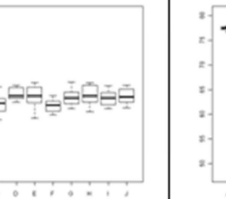
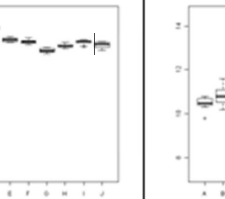
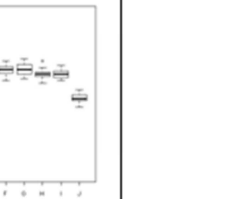
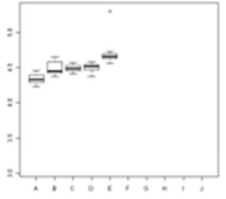
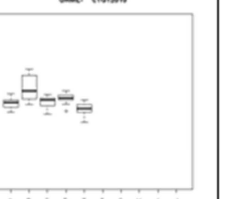
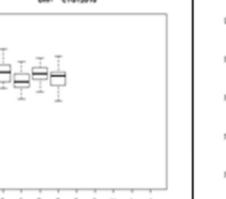
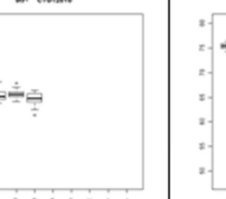
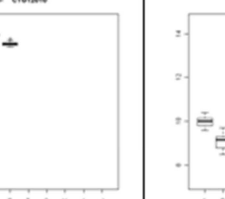
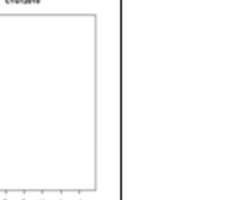
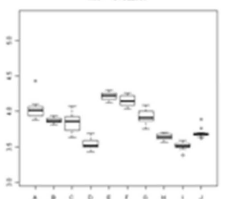
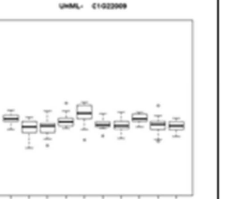
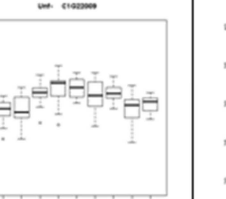
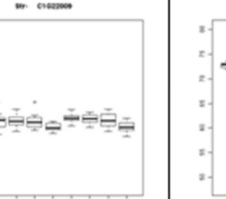
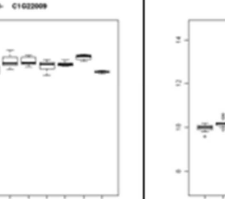
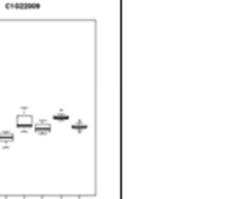
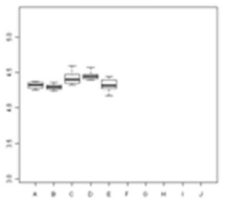
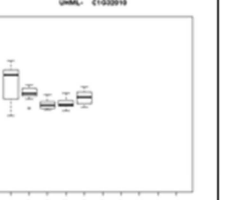
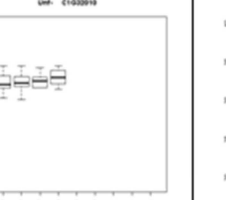
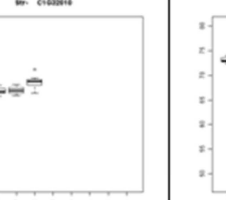
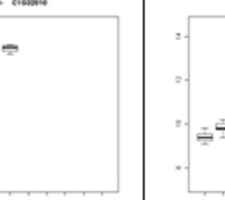
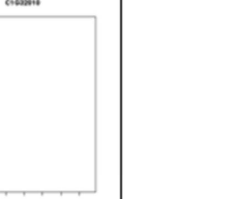
- Philippeau, G. (1989). Théorie des plans d'expérience, application à l'agronomie. 205 p.
- R_Development_Core_Team. (2005). "R: A language and environment for statistical computing. ." from <http://www.R-project.org>.
- Raingear, J. (1968). Note sur l'influence du mode et de la date de la récolte sur la technologie de la fibre. Coton et Fibres Tropicales 23(3): 363-364.
- Raymond, G. and C. Marquié (1995). La graine de cotonnier et ses produits. OCL 2(6): 422-424.
- Roberty, G. (1949). Variation de longueur dans les poils d'une même graine de coton. Coton et Fibres Tropicales 4(1): 25-32.
- Roch, J. (1975). Récolte mécanique de 3 variétés de cotonniers en Côte d'Ivoire. Coton et Fibres Tropicales 30(4): 475-479.
- Roerich, O. (1947). Les caractères technologiques de la fibre de coton. Coton et Fibres Tropicales 2(IV (Décembre 1947)): 115-128.
- Roerich, O. (1947). Méthode générale d'étude des caractères technologiques des fibres textiles végétales (2^{ème} partie) : Les caractères technologiques de la fibre de coton. Coton et fibres Tropicales 2(3): 81-89.
- Saporta, G. (2006). Probabilité , Analyse des données et statistique.
- Sasser, P. E. and J. F. Moore (1992). A historical perspective of high volume instrument developments in the U. S. Brême: 21-25.
- Sasser, P. E. and C. B. Smith (1984). High Volume Instrument test system a tool for textile manufacturing. International Committee on Cotton Testing Methods, Bremen.
- SOSEA (1990). Classement de la fibre de coton Le Havre, SOSEA: 30 p.
- Stewart, J. M. (1975). Fiber initiation on the cotton ovule (*Gossypium hirsutum*). American Journal of Botany 62(7): 723-730.
- Taha, M. G. and J. Bourély (1989). Etude en microscopie électronique de la formation des parois de fibres du *Gossypium barbadense* L. en Egypte. Coton et Fibres Tropicales 44(2): 95-115.

USDA, Ed. (2001). The classification of cotton. Revision 2001. Washington (USA), USDA.

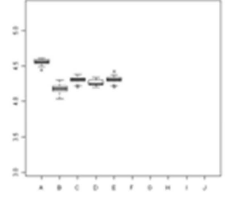
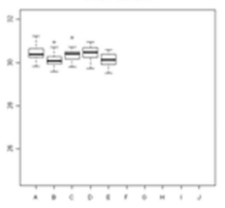
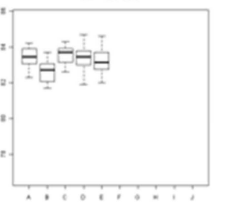
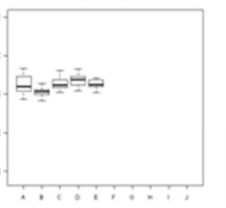
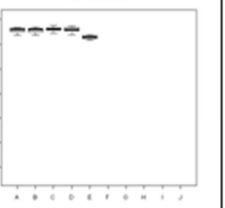
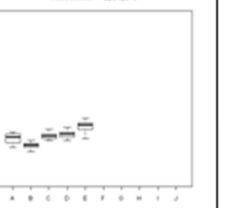
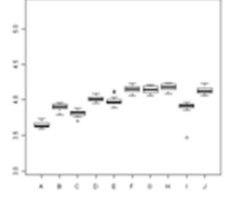
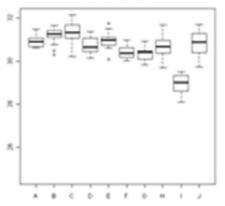
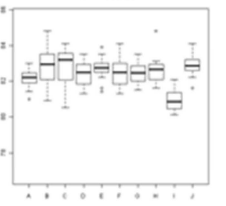
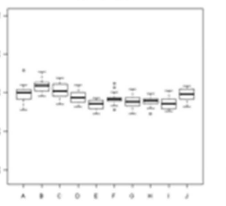
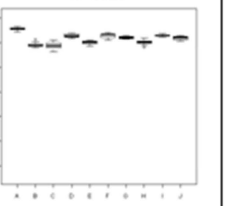
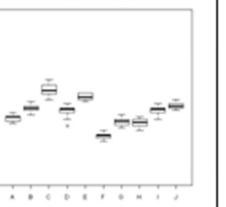
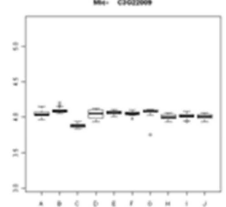
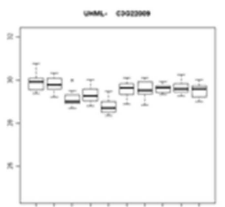
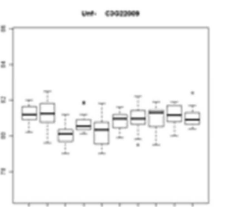
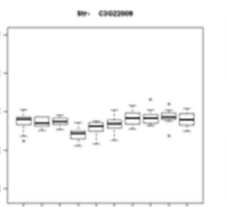
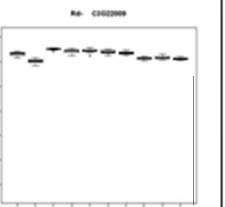
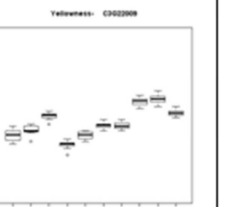
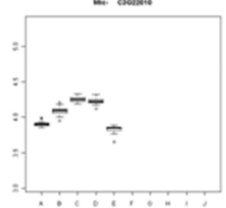
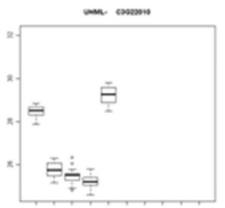
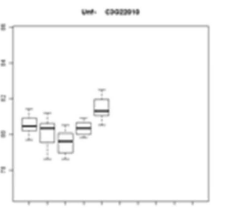
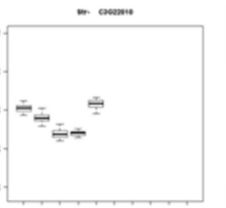
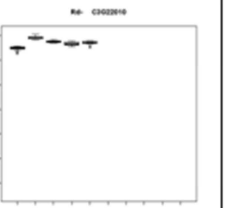
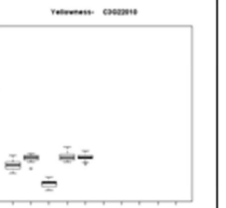
Waterkeyn, L. (1987). Light microscopy of the cotton fibre. Cotton fibres: their development and properties. Technical monograph from the Belgian Cotton Research Group. Manchester (UK), International Institute for Cotton: 17-22.

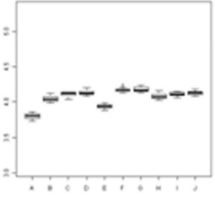
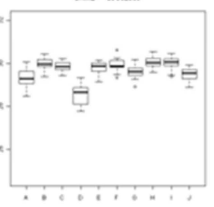
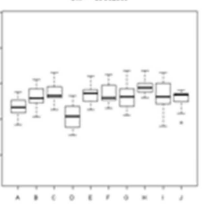
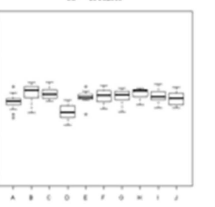
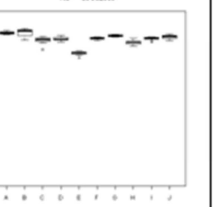
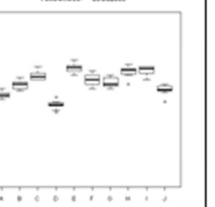
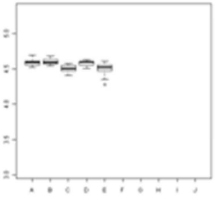
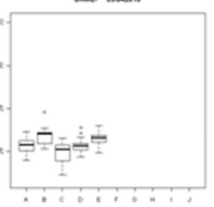
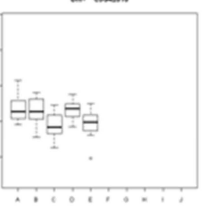
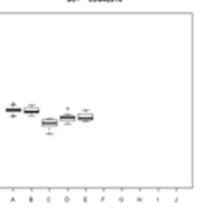
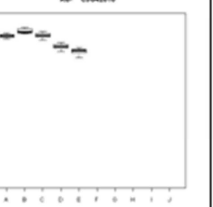
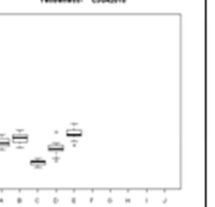
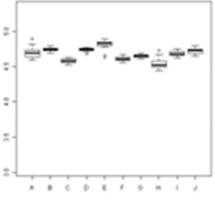
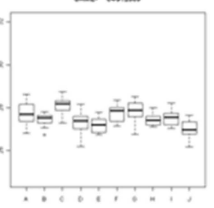
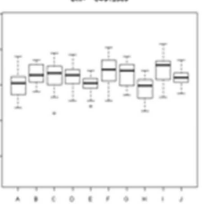
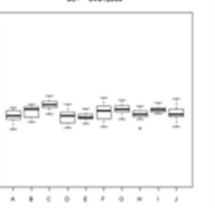
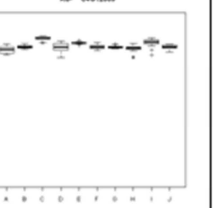
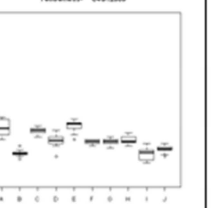
Annexe 1

Boxplots par variable, par situation et par saison dans l'étude de variabilité intra-balle

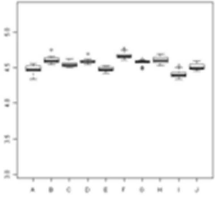
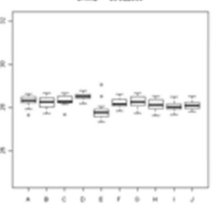
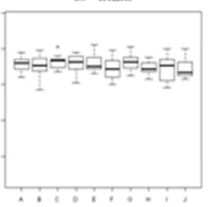
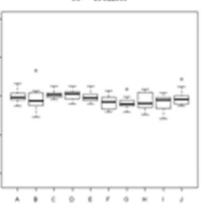
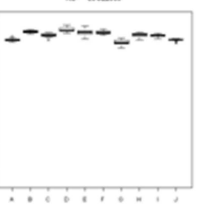
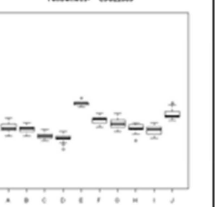
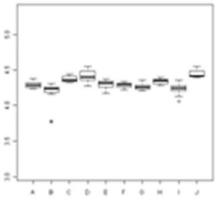
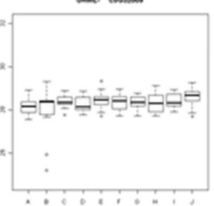
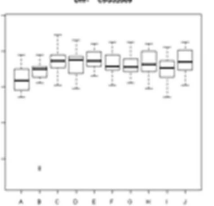
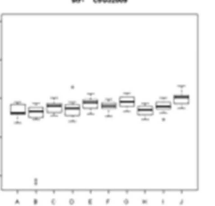
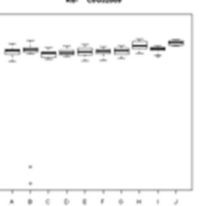
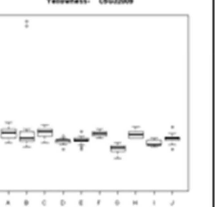
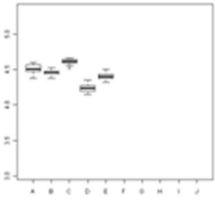
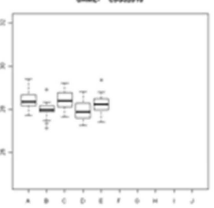
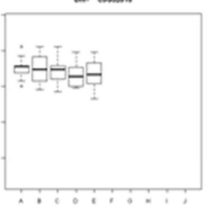
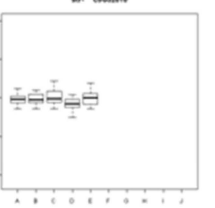
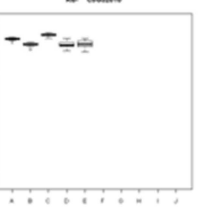
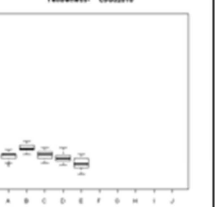
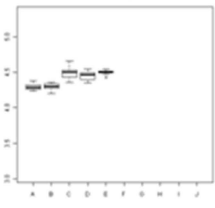
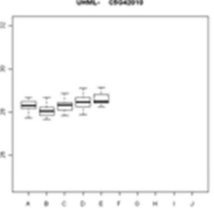
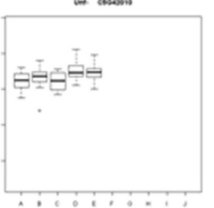
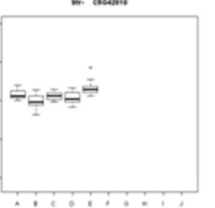
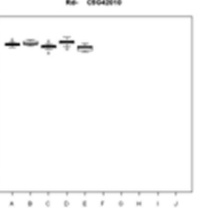
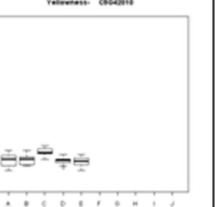
Code	Année	Mic	UHML	UI	Strength	Rd	Yellowness
C1G1	2008-2009						
	2009-2010						
C1G2	2008-2009						
	2009-2010	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C1G3	2008-2009	Non	Non	Non	Non	Non	Non
	2009-2010						

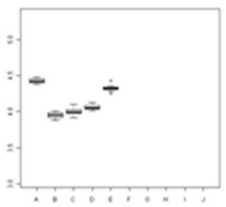
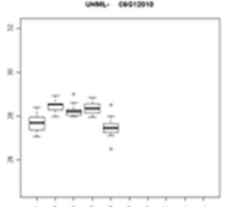
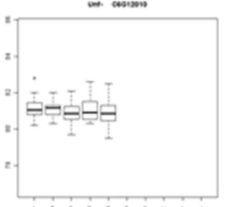
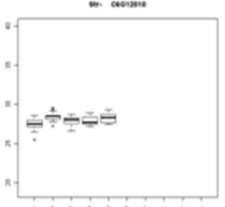
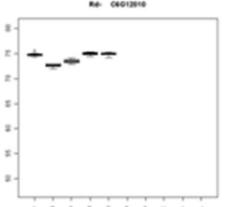
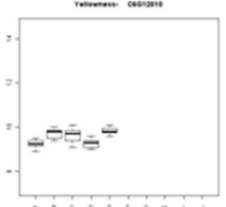
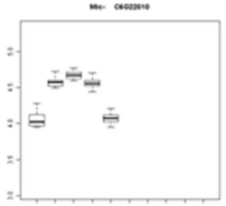
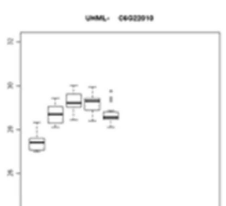
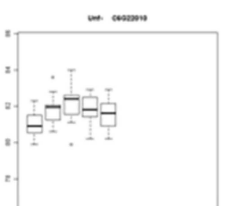
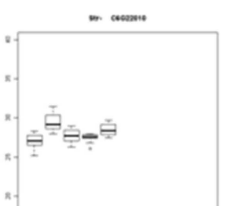
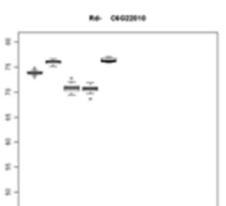
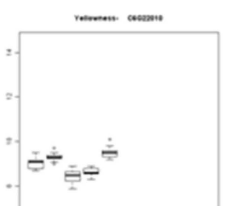
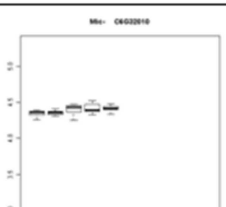
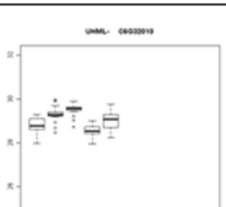
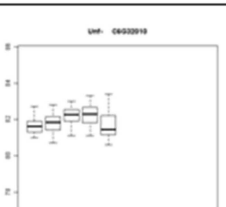
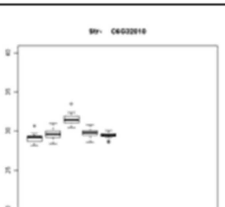
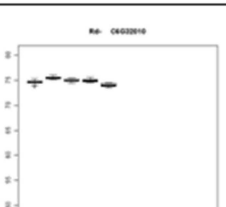
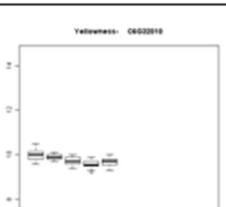
Code	Année	Mic	UHML	UI	Strength	Rd	Yellowness
C2G1	2008-2009						
	2009-2010						
C2G2	2008-2009						
	2009-2010	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C2G3	2008-2009						
	2009-2010	Non	Non	Non	Non	Non	Non

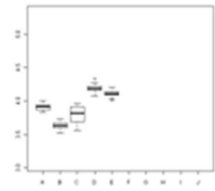
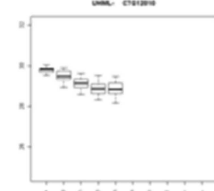
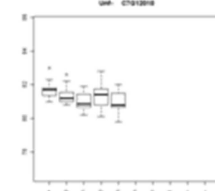
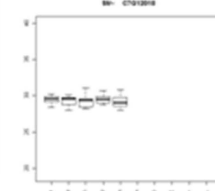
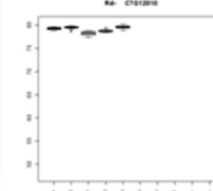
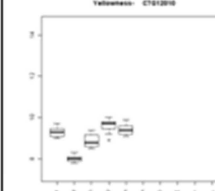
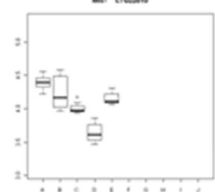
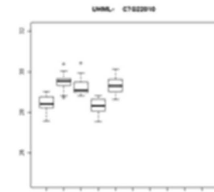
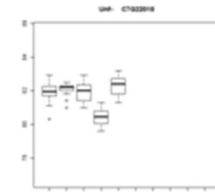
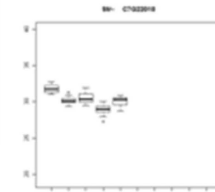
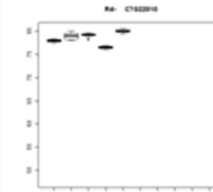
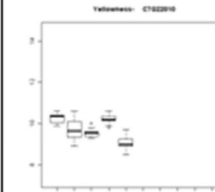
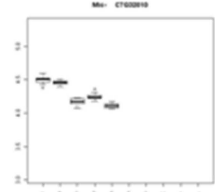
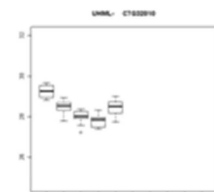
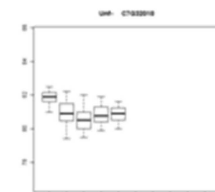
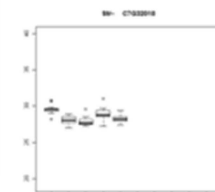
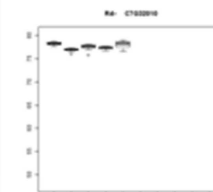
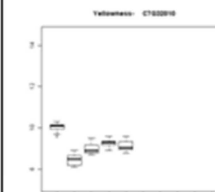
Code	Année	Mic	UHML	UI	Strength	Rd	Yellowness
C2G4	2008-2009	Non	Non	Non	Non	Non	Non
	2009-2010						
C3G1	2008-2009						
	2009-2010	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C3G2	2008-2009						
	2009-2010						

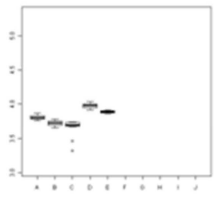
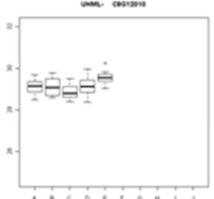
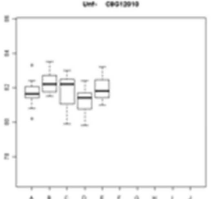
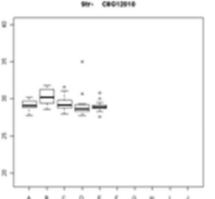
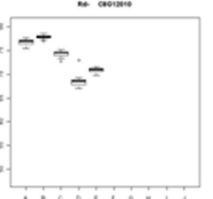
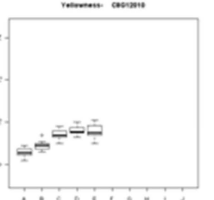
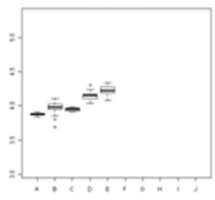
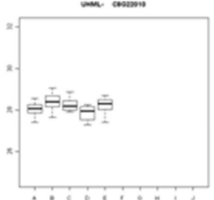
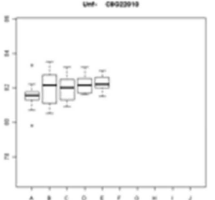
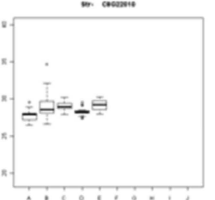
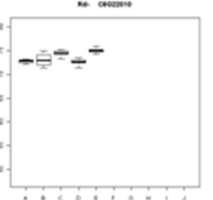
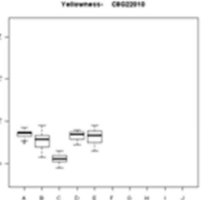
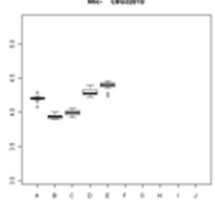
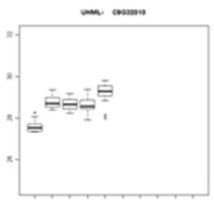
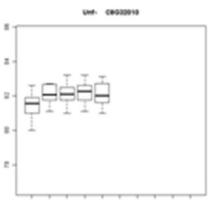
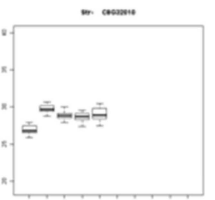
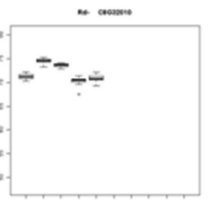
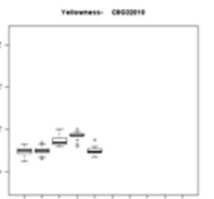
Code	Année	Mic	UHML	UI	Strength	Rd	Yellowness
C3G3	2008-2009						
	2009-2010	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C3G4	2008-2009	Non	Non	Non	Non	Non	Non
	2009-2010						
C4G1	2008-2009						
	2009-2010	Non	Non	Non	Non	Non	Non

Code	Année	Mic	UHML	UI	Strength	Rd	Yellowness
C4G2	2008-2009	Non	Non	Non	Non	Non	Non
	2009-2010						
C4G3	2008-2009	Non	Non	Non	Non	Non	Non
	2009-2010						
C5G1	2008-2009						
	2009-2010	Non	Non	Non	Non	Non	Non

Code	Année	Mic	UHML	UI	Strength	Rd	Yellowness
C5G2	2008-2009						
	2009-2010	Non	Non	Non	Non	Non	Non
C5G3	2008-2009						
	2009-2010						
C5G4	2008-2009	Non	Non	Non	Non	Non	Non
	2009-2010						

Code	Année	Mic	UHML	UI	Strength	Rd	Yellowness
C6G1	2008-2009	Non	Non	Non	Non	Non	Non
	2009-2010						
C6G2	2008-2009	Non	Non	Non	Non	Non	Non
	2009-2010						
C6G3	2008-2009	Non	Non	Non	Non	Non	Non
	2009-2010						

Code	Année	Mic	UHML	UI	Strength	Rd	Yellowness
C7G1	2008-2009	Non	Non	Non	Non	Non	Non
	2009-2010						
C7G2	2008-2009	Non	Non	Non	Non	Non	Non
	2009-2010						
C7G3	2008-2009	Non	Non	Non	Non	Non	Non
	2009-2010						

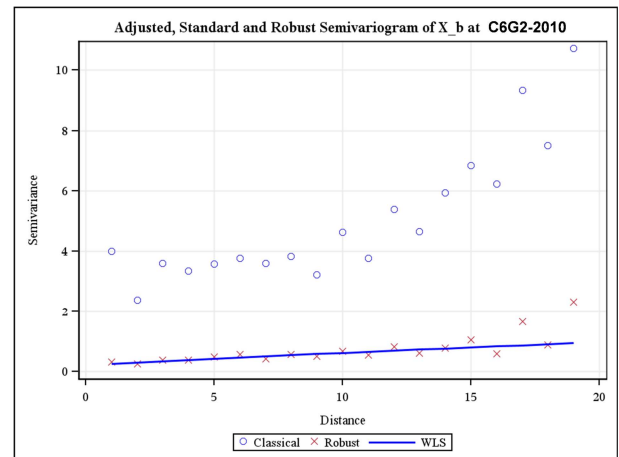
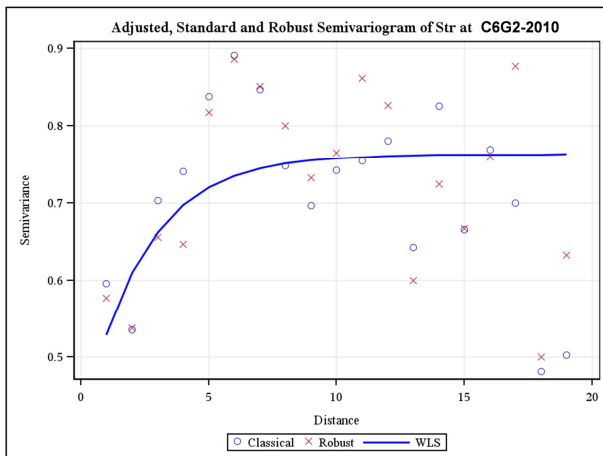
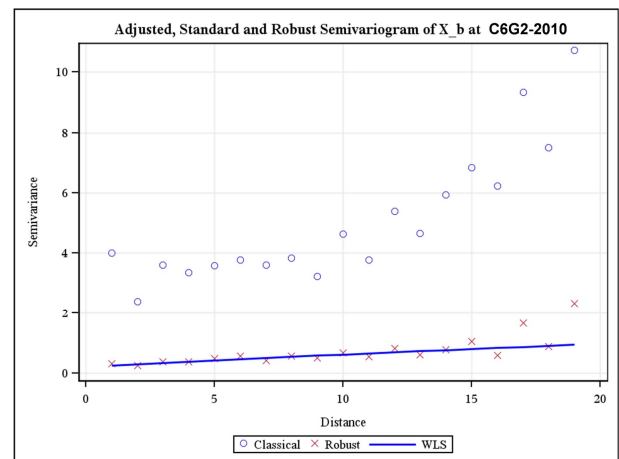
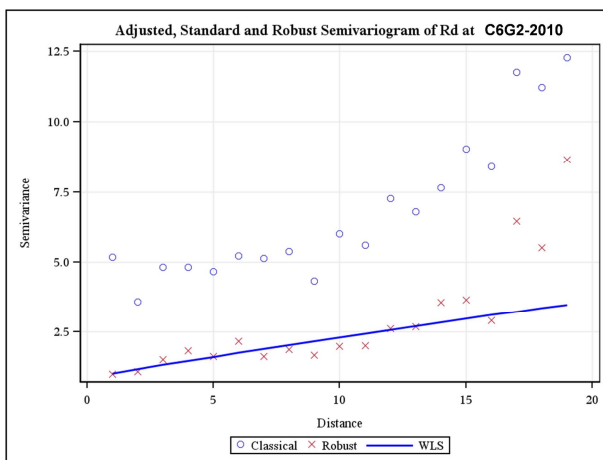
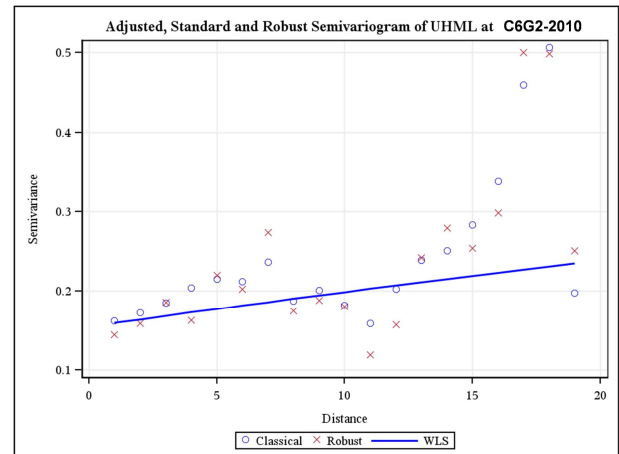
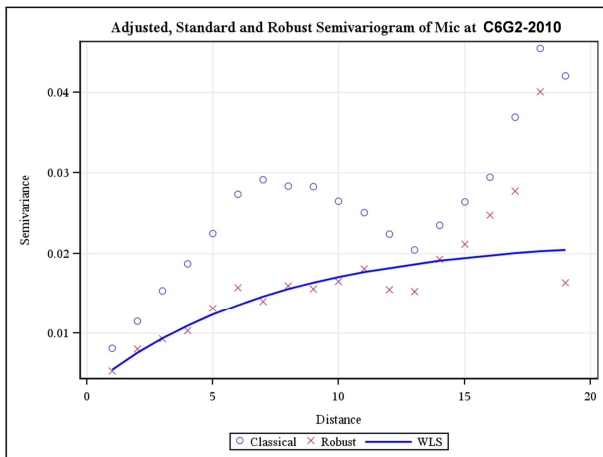
Code	Année	Mic	UHML	UI	Strength	Rd	Yellowness
C8G1	2008-2009	Non	Non	Non	Non	Non	Non
	2009-2010						
C8G2	2008-2009	Non	Non	Non	Non	Non	Non
	2009-2010						
C8G3	2008-2009	Non	Non	Non	Non	Non	Non
	2009-2010						

Annexe 2 : Valeurs des effets de pépité

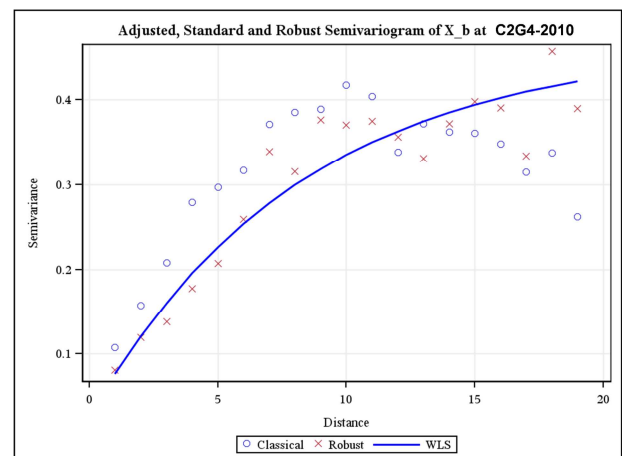
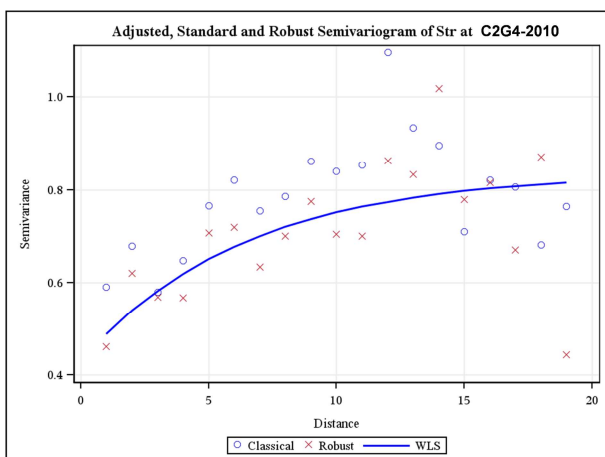
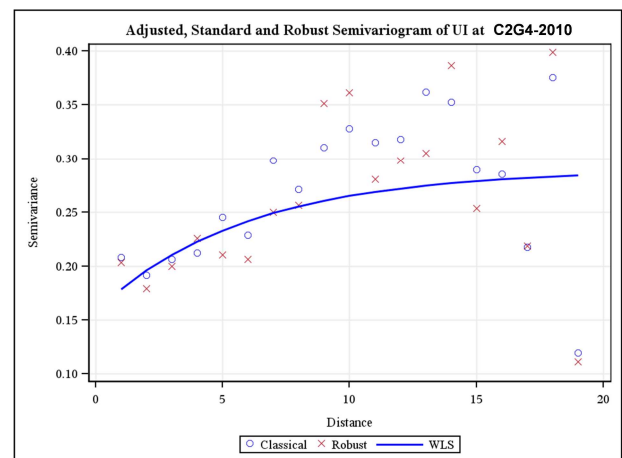
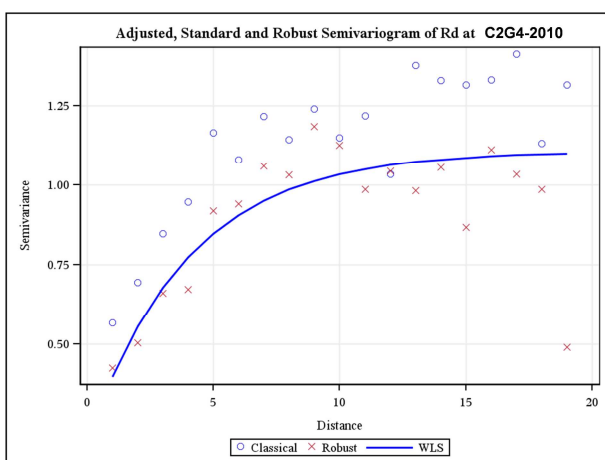
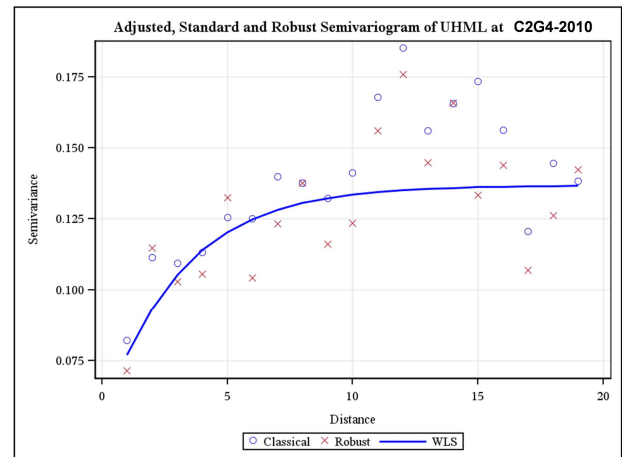
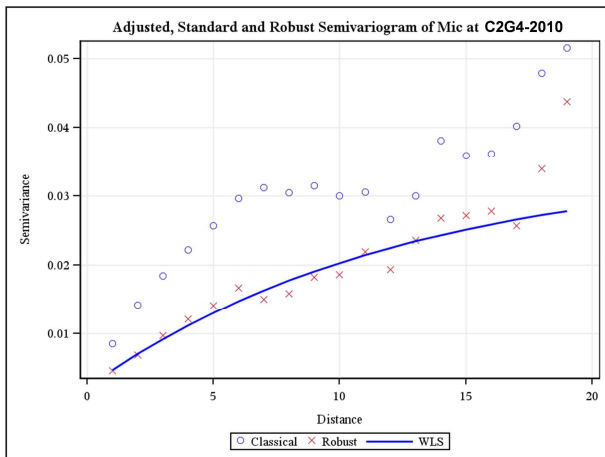
Code Usine	Année	Pépité IM	Pépité UHML	Pépité UI	Pépité Str	Pépité Rd	Pépité Xb
C1G1	2009	0.001667	0.000000	0.368681	1.058630	0.357513	0.051332
C1G1	2010	0.002723	0.000000	0.495044	0.500000	0.177722	0.083098
C1G3	2010	0.000845	0.301776	0.439179	0.656252	0.188110	0.037252
C2G1	2009	0.001813	0.132989	0.478587	0.666212	0.284012	0.090523
C2G1	2010	0.002812	0.147102	0.638394	0.644576	0.150604	0.000000
C2G2	2009	0.003960	0.171248	0.547197	0.683857	0.667004	0.109603
C2G3	2009	0.003536	0.341362	1.543054	1.674132	0.402292	0.176509
C2G4	2010	0.000418	0.100000	0.000000	0.430314	0.658453	0.056412
C3G1	2009	0.003813	0.192809	0.738008	0.800866	0.475252	0.077017
C3G2	2009	0.001097	0.104676	0.333481	0.838296	0.300115	0.073921
C3G2	2010	0.003564	0.144741	0.531773	0.386267	0.000000	0.017800
C3G3	2009	0.000802	0.092669	0.226266	0.685071	0.290149	0.047660
C3G4	2010	0.004823	0.248883	0.500000	0.525620	0.500000	0.054238
C4G1	2009	0.002896	0.379304	0.500000	1.841600	0.794482	0.158674
C4G2	2010	0.013137	0.141906	0.500000	0.839138	0.801186	0.187703
C4G3	2009	0.014060	0.090860	0.665302	1.146200	0.753504	0.110185
C5G1	2009	0.000741	0.087235	0.314376	0.577767	0.302831	0.049118
C5G2	2009	0.002487	0.084139	0.349747	0.429200	0.454576	0.089039
C5G2	2009	0.002850	0.101810	0.419903	1.283221	0.449451	0.077136
C5G3	2009	0.002962	0.152096	0.182437	0.000000	0.511593	0.025589
C5G3	2009	0.003328	0.157438	0.518117	0.651958	0.256380	0.130174
C5G3	2010	0.003782	0.169972	0.500000	0.751098	0.057799	0.061283
C5G4	2010	0.004015	0.145412	0.436265	0.500000	0.337472	0.087234
C6G2	2010	0.007182	0.318593	0.818810	0.939537	0.212952	0.062782
C6G3	2010	0.002285	0.192021	0.500000	0.324937	0.056451	0.030209
C8G1	2010	0.000751	0.216435	0.790780	1.082127	0.128845	0.014677
C8G2	2010	0.000368	0.160856	0.521782	0.743737	0.275423	0.048112
C8G3	2010	0.000368	0.156136	0.557273	0.628579	0.339621	0.028937

Annexe 3 :
Variogrammes par usine et par caractéristique
technologique

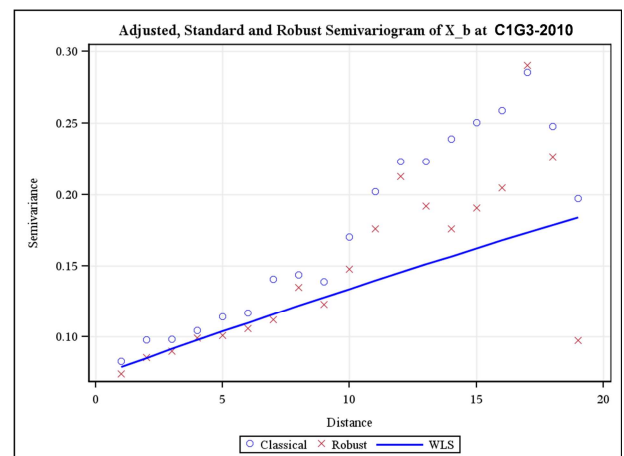
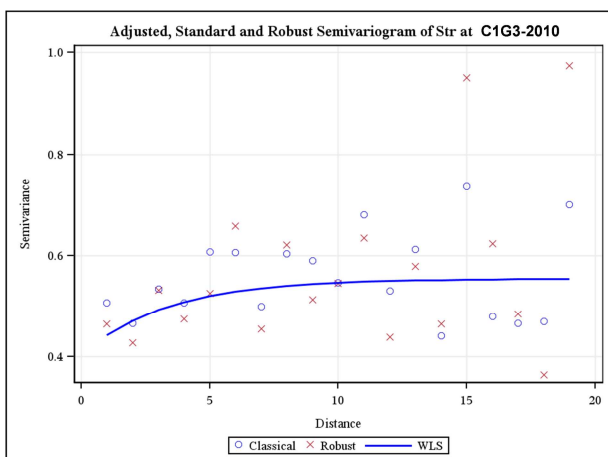
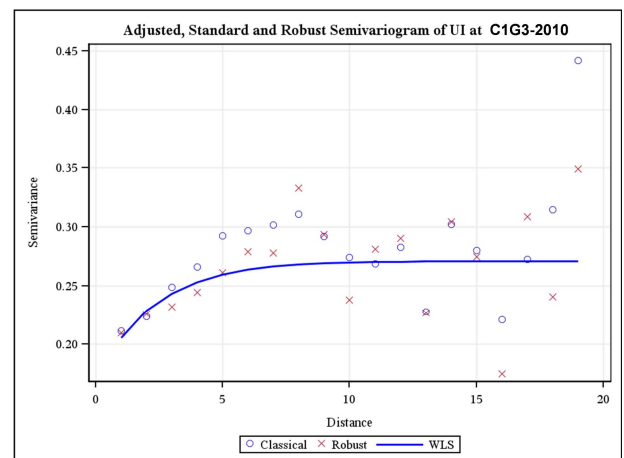
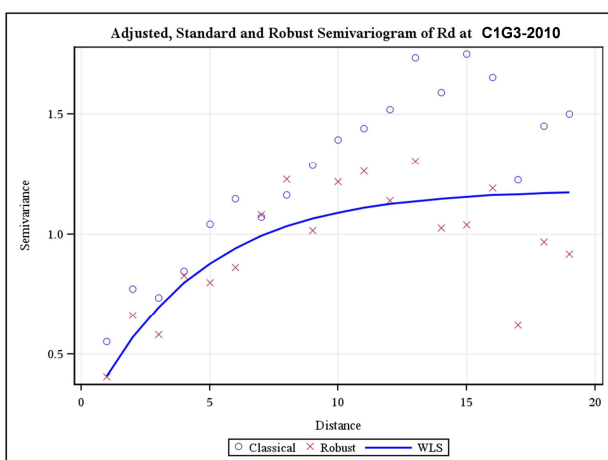
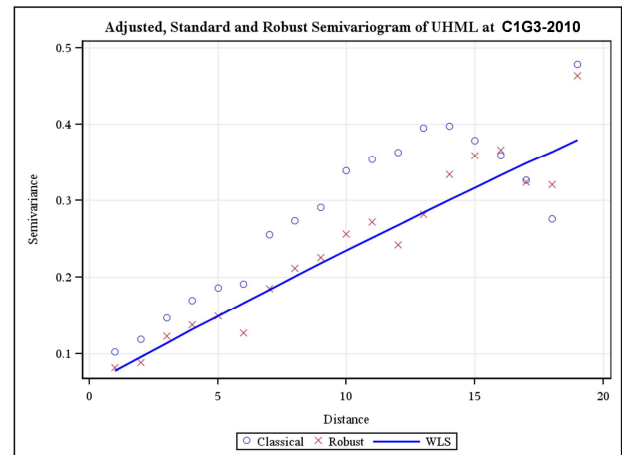
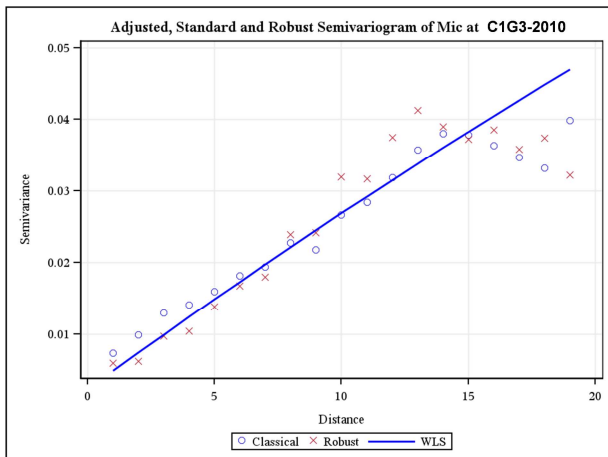
▪



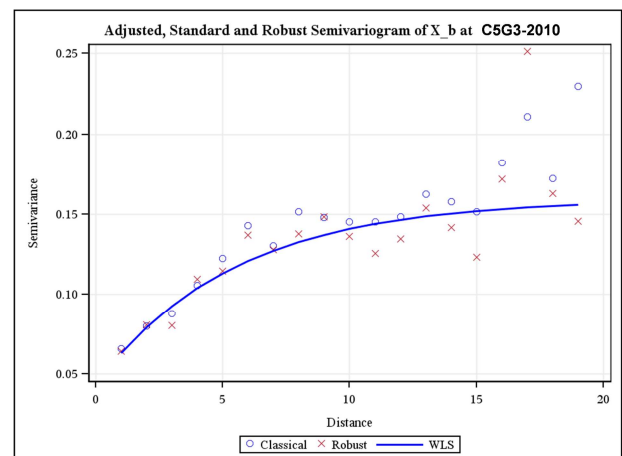
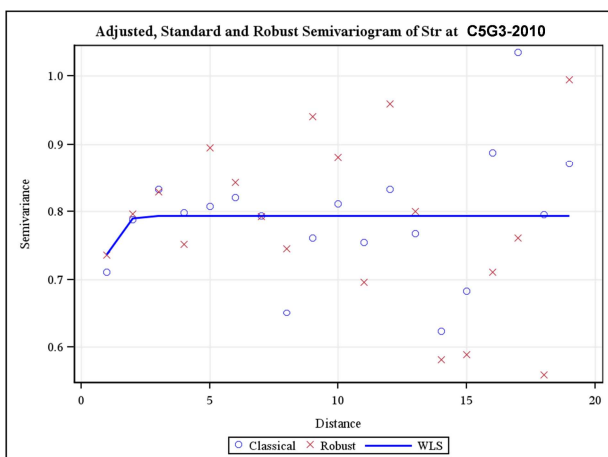
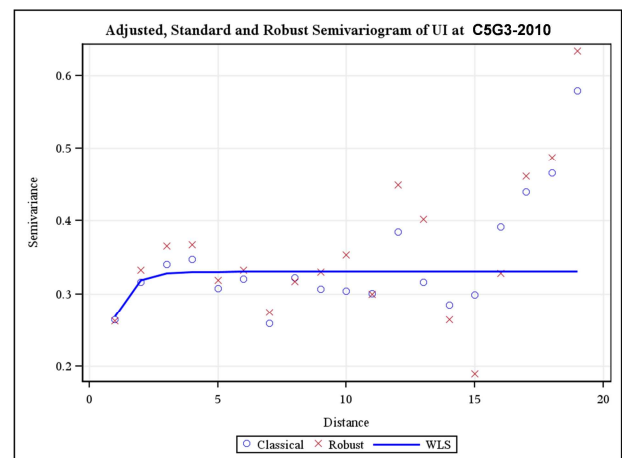
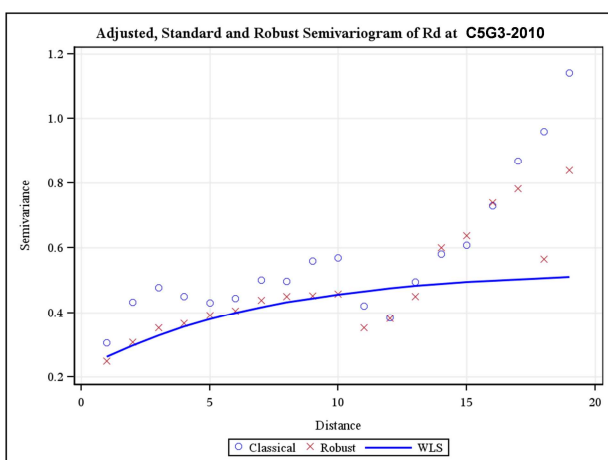
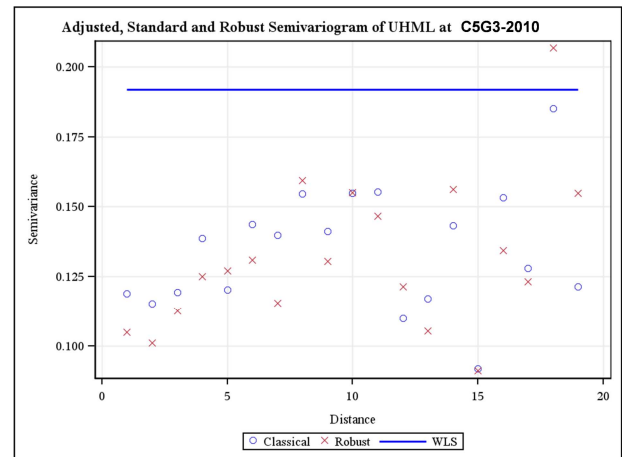
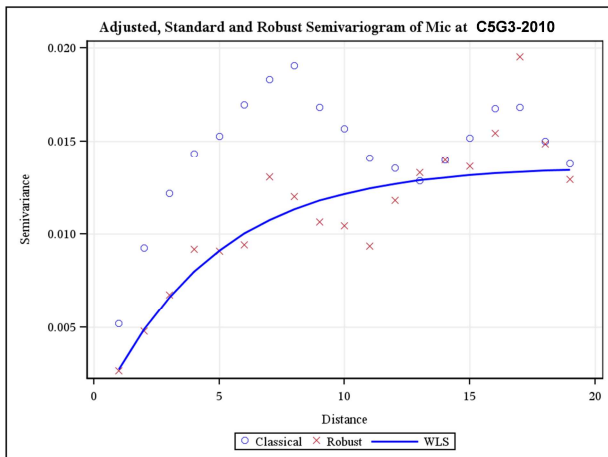
Variogrammes des différentes caractéristiques technologiques pour la situation C6G2-2010.



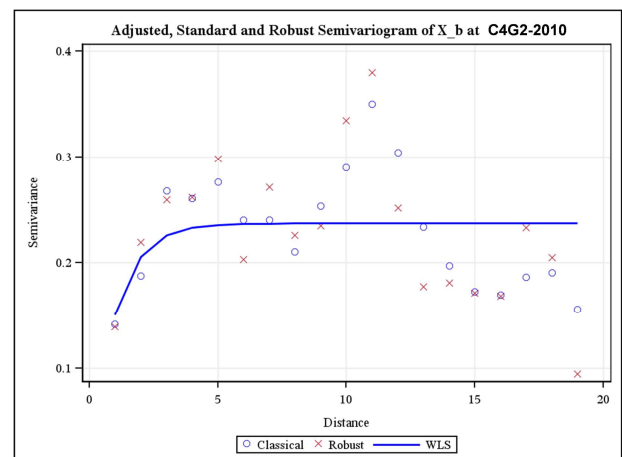
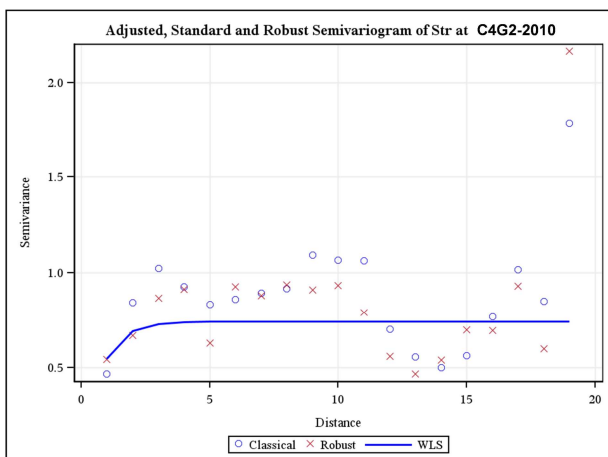
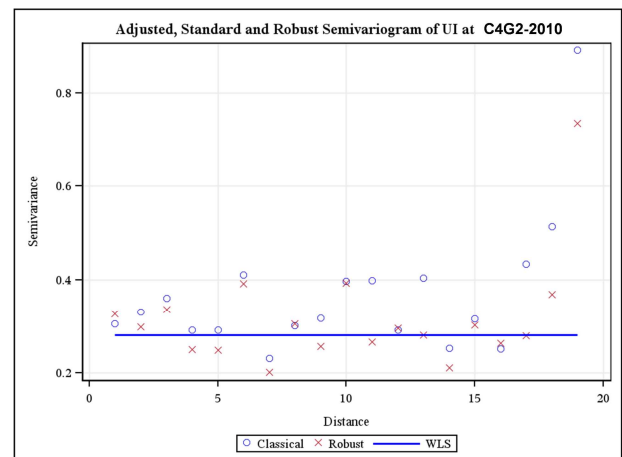
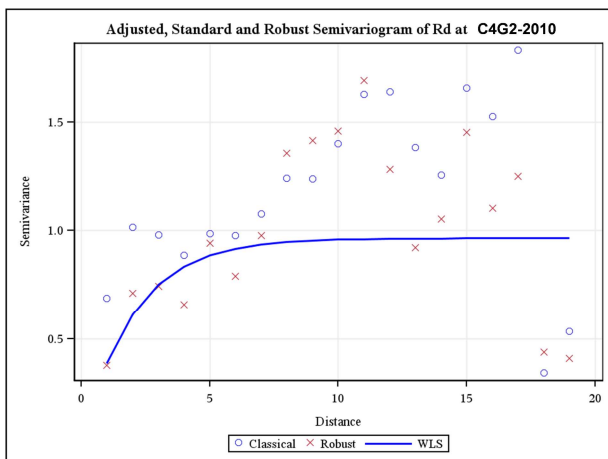
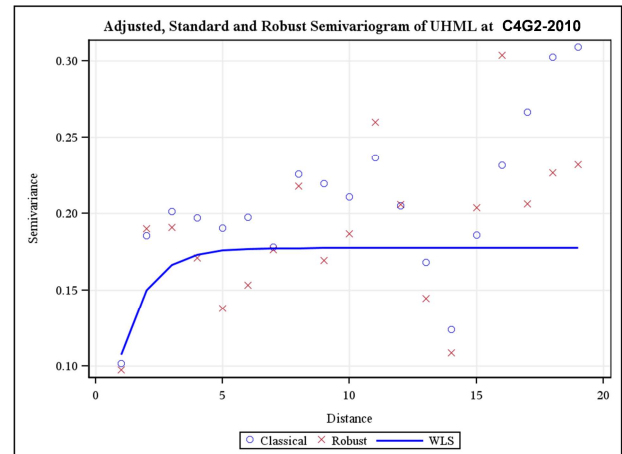
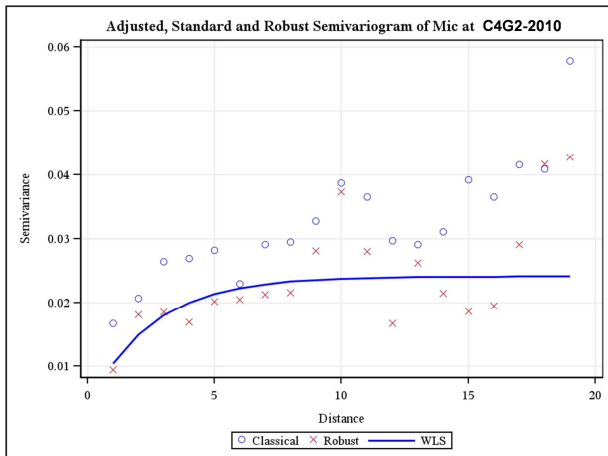
Variogrammes des différentes caractéristiques technologiques pour la situation C2G4-2010.



Variogrammes des différentes caractéristiques technologiques pour la situation C1G3-2010.



Variogrammes des différentes caractéristiques technologiques pour la situation C5G3-2010.



Variogrammes des différentes caractéristiques technologiques pour la situation C46G2-2010.